

**А. И. Грабченко, В. А. Федорович**

**3D ПРОЦЕССЫ  
АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ**

Харьков НТУ «ХПИ» 2008

ББК 34.59

УДК 621.92

Рецензенты: Ю. Н. Внуков, д-р. техн. наук, проректор,  
Запорожский национальный технический университет

В. А. Залога, д-р. техн. наук, заведующий кафедрой,  
Сумской государственной университет

Грабченко А. И., Федорович В. А. 3D процессы алмазно-абразивной обработки. Монография.  
– Харьков: НТУ “ХПИ”, 2008. – 345 с.

ISBN

В монографии излагаются основы исследования алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования в трехмерном (пространственном) представлении. Рассматриваются современные тенденции объектно-ориентированного статистического моделирования применительно к алмазно-абразивным инструментам, напряженно-деформированному состоянию зоны шлифования, а также вопросы практического применения результатов 3D моделирования.

Предназначено для студентов, магистров и аспирантов, преподавателей технических вузов, а также может быть полезным для специалистов-технологов.

У монографії викладаються основи досліджень алмазно-абразивних інструментів і процесів шліфування в тривимірному уявленні. Розглядаються сучасні тенденції об'єктно-орієнтованого статистичного моделювання стосовно алмазно-абразивних інструментів, напружено-деформованого стану зони шліфування, а також питання практичного застосування результатів 3D моделювання.

Призначено для студентів, магістрів і аспірантів, викладачів технічних вузів, а також може бути корисним для фахівців-технологів.

Ил. 149. Табл. 27. Библиогр. 46 назв.

ББК 34.59

ISBN

© Грабченко А. И., Федорович В. А.,  
2008 г.

## Содержание

Предисловие.....	7
Введение .....	12
<b>Глава 1. Предпосылки изучения процесса алмазного шлифования в трехмерном (3D) представлении.....</b>	<b>17</b>
1.1. Современные тенденции создания и эффективного применения сверхтвердых материалов .....	17
1.2. Общая характеристика сверхтвердых материалов (СТМ).....	19
1.3. Анизотропия физико-механических свойств СТМ и алмазных зерен.....	25
1.4. Структурные изменения в сверхтвердых материалах в условиях алмазного шлифования.....	27
1.5. Анализ процесса шлифования с позиций микроразрушения взаимодействующих поверхностей.....	33
1.6. Анализ обрабатываемости и выбор базового метода обработки СТМ .....	40
1.7. Принципиальные особенности процесса алмазного шлифования сверхтвердых материалов.....	45
Выводы.....	51
<b>Глава 2. Методологические основы изучения процесса шлифования в трехмерном (3D) представлении .....</b>	<b>53</b>
2.1. Процесс приспособляемости и управление рельефом кругов при алмазно-абразивной обработке .....	53
2.2. Обеспечение комплексного подхода к исследованию процесса топографической, структурно-фазовой и энергетической приспособляемости .....	56
2.3. Изучение 3D параметров рабочей поверхности алмазных кругов и поверхности СТМ методом лазерного сканирования .....	59
2.4. Исследование 3D напряженно-деформированного состояния (НДС) зоны шлифования.....	64
2.5. Теоретическое и экспериментальное определение динамической прочности алмазных зерен в круге .....	70
2.6. Определение удельного износа и коэффициента использования потенциальных режущих свойств алмазных зерен .....	75
2.7. Методика определения фактической площади контакта в системе «СТМ–зерно–связка» .....	77

2.8. Разработка методики оценки приспособляемости при шлифовании.....	80
2.9. Методика изучения усталостно-циклического разрушения обрабатываемого СТМ и зерен круга при микрорезании.....	82
2.10. Методика цветометрического компьютерного изучения параметров рабочей поверхности кругов (РПК) и дефектов поверхности СТМ .....	85
Выводы.....	87
<b>Глава 3. Моделирование процесса спекания алмазных кругов .....</b>	<b>91</b>
3.1. Влияние технологических режимов спекания кругов и свойств связок на целостность алмазных зерен.....	91
3.2. Влияние марки алмазных зерен на их целостность при спекании.....	99
3.3. Влияние размера и концентрации алмазных зерен на их целостность при спекании .....	105
Выводы.....	110
<b>Глава 4. Процесс приспособляемости при алмазном шлифовании .....</b>	<b>112</b>
4.1. Анализ алмазного шлифования с позиций представлений о приспособляемости двух взаимодействующих поверхностей .....	112
4.2. Систематика процесса приспособляемости .....	116
4.3. Трансформация механизмов разрушения в процессе приспособляемости .....	129
4.4. Топографическая приспособляемость в процессе алмазного шлифования.....	133
4.5. Структурно-фазовые аспекты приспособляемости .....	137
4.6. Влияние анизотропии свойств кристаллитов СТМ.....	140
4.7. Анализ причин возникновения дефектного слоя .....	144
Выводы.....	148
<b>Глава 5. Микроразрушение элементов системы «СТМ–зерно–связка» в процессе шлифования .....</b>	<b>151</b>
5.1. Факторы, определяющие съем СТМ в процессе алмазного шлифования .....	151
5.2. Методология 3D моделирования напряженно-деформированного состояния зоны шлифования .....	156
5.3. Исследование 3D напряженно-деформированного состояния системы «СТМ–зерно–связка» .....	161



5.3.1. 3D НДС зоны шлифования при точечном контакте зерна .....	163
5.3.2. 3D НДС зоны шлифования при линейном контакте зерна .....	167
5.3.3. 3D НДС зоны шлифования при контакте зерна по плоскости.....	171
5.4. Моделирование совместной работы различно ориентированных зерен при контакте с поликристаллом .....	176
5.5. Теоретический анализ величины удельного расхода и износа алмазных зерен .....	180
5.6. Модуль упругости связки и интенсивность взаимного микроразрушения элементов системы «СТМ–зерно–связка».....	186
5.7. Усталостно-циклическое микроразрушение элементов системы «СТМ–зерно» .....	194
Выводы.....	203
<b>Глава 6. Топографическая приспособляемость рабочих поверхностей в зоне шлифования .....</b>	<b>205</b>
6.1. Теоретический анализ топографической приспособляемости при шлифовании СТМ.....	205
6.2. Изменение фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ» в процессе приспособляемости .....	217
6.3. Экспериментальное исследование изменения параметров топографии поверхности круга и СТМ.....	224
6.4. Взаимосвязь параметров топографии поверхностей в процессе приспособляемости.....	227
6.5. Влияние анизотропии физико-механических свойств алмазных зерен на топографическую приспособляемость РПК.....	231
6.6. Влияние топографии круга на 3D напряженно-деформированное состояние зоны шлифования .....	237
Выводы.....	244
<b>Глава 7. Разработка методологии управления процессом приспособляемости и способов ее реализации .....</b>	<b>247</b>
7.1. Разработка методологии управления топографической, структурно-фазовой и энергетической приспособляемостью.....	247
7.2. Принудительное формирование режущего субмикрорельефа алмазных зерен .....	252

7.3. Моделирование процесса шлифования сверхтвердых материалов с управлением РПК .....	259
7.4. Разработка адаптивной системы управления параметрами РПК ....	263
7.5. Способы ультразвукового шлифования с адаптивным комбинированным управлением РПК .....	265
7.6. Роль частоты собственных и вынужденных колебаний алмазных зерен при шлифовании сверхтвердых материалов .....	268
7.7. Разработка способа термоактивируемой доводки лезвийного инструмента из СТМ на основе алмаза .....	271
7.8. Пути повышения эффективности процесса алмазного шлифования СТМ .....	280
Выводы .....	286
<b>Глава 8. Разработка экспертной системы процесса алмазного шлифования СТМ.....</b>	<b>288</b>
8.1. Методология разработки экспертной системы процесса шлифования .....	288
8.2. Разработка теоретического модуля экспертной системы .....	294
8.2.1. Методология определения оптимальных характеристик алмазных кругов.....	295
8.2.2. Подсистема определения условий бездефектного алмазного шлифования СТМ.....	303
8.2.3. Подсистема обеспечения надежности лезвийного инструмента из СТМ на стадии его изготовления .....	307
8.3. Разработка экспериментального модуля экспертной системы .....	312
8.3.1. Разработка целевых функций экспериментальной экспертной системы.....	312
8.3.2. Структура и принцип работы экспериментального модуля экспертной системы .....	315
8.4. Условия и способы повышения качества поверхности и надежности лезвийного инструмента из СТМ.....	319
8.5. Оптимизация процесса алмазного шлифования СТМ .....	323
Выводы .....	327
Список использованных источников .....	329
Приложения .....	

## Предисловие

*Alea iacta est – Жребий брошен.*

Чем больше человек будет становиться человеком, тем меньше он согласится на что-либо иное, кроме бесконечного и неистребимого движения к новому.

Пьер Тейяр де Шарден

Современные тенденции создания наукоемкой продукции характеризуются резким расширением приложений математики, во многом связанным с созданием и развитием средств вычислительной техники. Суть математизации состоит в построении математических моделей явлений и процессов и разработке методов их исследования. В физике и механике, являющихся базой при разработке рабочих процессов алмазно-абразивной обработки материалов, построение математических моделей для описания различных явлений и изучение этих моделей с целью объяснения старых или предсказания новых эффектов являются общепринятыми. Это положение должно быть хорошо усвоено студентами.

В настоящее время в мировой практике при изучении процессов обработки материалов резанием наблюдается тенденция перехода от 2D к 3D представлениям. Предпосылкой такого перехода является развитие методов статистического моделирования и конечных элементов, аппаратных возможностей вычислительной техники и программного обеспечения на базе визуальных объектно-ориентированных языков программирования. Все это повышает адекватность и информационность применяемых 3D моделей. Трехмерный подход существенно повышает достоверность результатов по сравнению с решением плоских задач, но главное – доказывает обучающемуся необходимость и эффективность трёхмерного представления объектов и процессов.

Создание систем 3D моделирования абразивно-алмазных инструментов позволяет существенно сократить объем экспериментальных исследований для определения рациональных конструктивных параметров, оптимальных условий их изготовления и использования.

Предлагаемая методология 3D моделирования основана на научных положениях теории резания материалов, формообразования поверхностей, проек-

тирования режущих инструментов, теоретической и прикладной статистике, методе конечных элементов, изложенных в работах отечественных и зарубежных ученых. При изучении процесса алмазного шлифования использована комплексная методология исследования единой 3D системы «обрабатываемый материал–зерно–связка», включающая 3D моделирование и экспериментальное изучение 3D параметров взаимодействующих поверхностей, изучение 3D напряженно-деформированного состояния (НДС) зоны шлифования и методики исследования процесса приспособляемости при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов. Используемая методология позволяет оценивать 3D НДС всех элементов системы одновременно, что важно при определении области оптимальных сочетаний их физико-механических свойств и режимов взаимодействия.

Монография составлена таким образом, что каждая глава представляет собой самостоятельный шаг в последовательном переходе к трёхмерным представлениям объектов и процессов.

*Глава 1. Предпосылки изучения процесса алмазного шлифования в трехмерном (3D) представлении.*

В главе излагается анализ путей повышения эффективности шлифования, прежде всего сверхтвердых материалов (СТМ), оцениваются тенденции в решении проблемы управления процессами контактного взаимодействия в предельных условиях, когда отсутствует требуемое теорией шлифования превышение твердости материала инструмента над твердостью обрабатываемого материала.

*Глава 2. Методологические основы изучения процесса шлифования в трехмерном (3D) представлении.*

В главе изложена методология и методики исследования процесса приспособляемости при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов. Разработанная методология комплексного исследования 3D единой системы «СТМ–зерно–связка» включает 3D моделирование и экспериментальное изучение 3D параметров взаимодействующих поверхностей, изучение 3D напряженно-деформированного состояния (НДС) зоны шлифования. Приведено описание ряда разработанных оригинальных методик, основанных на 3D теоретическом и экспериментальном изучении изменений параметров рабочей поверхности круга и обрабатываемого СТМ: определения динамической прочности алмазных зерен, оценки уровня приспособляемости, изучения усталостно-циклического разрушения СТМ и зерен с наложением ультразвуковых колеба-

ний, оценки коэффициента использования алмазных зерен, определения фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ», компьютерного цветометрического определения параметров РПК и дефектов на поверхности СТМ путем сканирования цветных фотографий, полученных в поляризованном свете. Показаны впервые преимущества примененного 3D моделирования напряженно-деформированного состояния единой системы «СТМ–зерно–связка» методом конечных элементов, а для изучения параметров топографии рабочей поверхности круга и СТМ использован метод лазерного сканирования.

### *Глава 3. Моделирование процесса спекания алмазных кругов.*

Анализируются теоретические исследования процесса изготовления алмазных шлифовальных кругов на металлической связке с целью определения условий снижения количества разрушенных зерен в инструменте после спекания. Приводятся результаты теоретических исследований, проведенных путем 3D моделирования напряженно-деформированного состояния зоны спекания алмазоносного слоя круга, в частности установлены влияние технологических параметров процесса и характеристик алмазоносного слоя на целостность зерен в круге. Формулируются практические рекомендации по составам алмазно-металлических композиций.

### *Глава 4. Процесс приспособляемости при алмазном шлифовании.*

В главе рассмотрен процесс алмазного шлифования с позиций приспособляемости двух существенно различных по топографии поверхностей: дискретной рабочей поверхности круга (РПК) и квазисплошной обрабатываемой поверхности сверхтвердого материала (СТМ). Определена роль основных составляющих процесса приспособляемости: топографической, структурно-фазовой и энергетической в трех основных ее этапах. Установлено влияние составляющих приспособляемости при традиционном алмазном шлифовании СТМ кругами на металлических связках на выходные показатели процесса обработки. Вскрыта определяющая роль относительной величины фактической площади контакта элементов системы «РПК–СТМ» в эффективности процесса алмазного шлифования. Приводится разработанная систематика составляющих процесса приспособляемости. Исследовано влияние анизотропии физико-механических свойств СТМ и алмазных зерен на процесс приспособляемости. Развито положение о возможности инверсии процесса приспособляемости и на этой основе выдвинута гипотеза о высоком потенциале управления приспособляемостью с целью использования положительных эффектов всего

ее диапазона для повышения эффективности процесса алмазного шлифования СТМ.

*Глава 5. Микроразрушение элементов системы «СТМ–зерно–связка» в процессе шлифования.*

Глава посвящена анализу теоретических исследований микроразрушения системы «СТМ–зерно–связка» в процессе алмазного шлифования. Теоретические исследования проведены путем 3D моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) зоны шлифования и разрушения элементов системы «зерно–СТМ–связка». Определены условия, обеспечивающие рациональное распределение энергии, подводимой в зону шлифования, между элементами системы, при которых наиболее эффективно будет разрушаться объём припуска либо съём будет минимизироваться до атомно-молекулярного уровня, обеспечивая прецизионность обработки. Получены исходные данные для разработки теоретического модуля экспертной системы процесса алмазного шлифования СТМ.

*Глава 6. Топографическая приспособляемость рабочих поверхностей в зоне шлифования.*

В главе приводится теоретико-экспериментальный анализ топографической приспособляемости 3D параметров топографии рабочей поверхности круга (РПК) и обрабатываемой поверхности сверхтвёрдого материала (СТМ) при алмазном шлифовании. Подчеркивается определяющая роль топографической составляющей процесса приспособляемости. Излагается методология теоретико-экспериментального определения фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ», влияния анизотропии физико-механических свойств алмазных зерен на интенсивность их износа и изменение параметров РПК. Рассмотрены вопросы теоретического обоснования возможности управления величиной фактической площади контакта. Анализируются теоретические зависимости, описывающие взаимосвязь и изменение топографических параметров приспособляемости.

*Глава 7. Разработка методологии управления процессом приспособляемости и способов ее реализации.*

В главе излагается разработанная методология комплексного управления процессом приспособляемости и способов ее реализации. Процесс управления приспособляемостью основан на принудительном регулировании величины фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ» путем одновременного дозируемого удаления связки (макроуровень) и принудительного фор-

мирования субмикрорельефа на алмазных зернах введением в зону шлифования и/или управления энергии ультразвуковых колебаний (микроуровень).

*Глава 8. Разработка экспертной системы процесса алмазного шлифования СТМ.*

Глава посвящена разработке экспертной системы процесса алмазного шлифования СТМ. Система состоит из двух взаимосвязанных модулей – теоретического и экспериментального, которые решают как самостоятельные задачи, так и дополняют друг друга.

Теоретический модуль экспертной системы базируется на аналитическом описании процессов взаимного микроразрушения элементов 3D системы «СТМ–зерно–связка» в различных условиях их взаимодействия. Он позволяет в компьютерном режиме прогнозировать количественные выходные показатели процесса и область оптимальных условий обработки СТМ различных марок, в том числе и вновь создаваемых. Достоинством этого модуля экспертной системы является возможность без длительных, трудоемких и дорогостоящих экспериментов анализировать широкий спектр взаимосвязанных факторов, влияющих на эффективность функционирования единой системы «СТМ–зерно–связка» в процессе шлифования.

Экспериментальный модуль экспертной системы создан на базе компьютерной обработки широкой гаммы экспертных исследований процесса алмазного шлифования различных марок СТМ и позволяет определять оптимальные условия процесса при конкретных ограничивающих факторах, т. е., при определенных реальных возможностях производства.

В монографии приводятся примеры использования таких пакетов программ, как объектно-ориентированная среда управления базами данных и создания приложений Visual FoxPro; математические пакеты MathCad и Maple; пакет для статистической обработки данных Statistica; пакеты для моделирования методом конечных элементов Cosmos и Third Wave AdvandEdge.

Авторы выражают глубокую благодарность всем помощникам, консультантам и рецензентам, обеспечившим выпуск настоящей монографии.

Адрес для переписки: 61002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ «Харьковский политехнический институт», кафедра «Резание материалов и режущие инструменты» (E-mail: [grabchenko@kpi.kharkov.ua](mailto:grabchenko@kpi.kharkov.ua)).

## Введение

В современных условиях развития рыночной экономики в Украине важнейшим фактором успешной деятельности предприятий является повышение качества и снижение себестоимости выпускаемой продукции. В машиностроительных отраслях промышленности эти факторы неразрывно связаны с интенсификацией механической обработки, которая в свою очередь во многом определяется работоспособностью режущего инструмента. Таким образом, повышение ресурса работы инструмента является необходимым условием эффективного функционирования современного машиностроительного предприятия. Далеко не раскрытыми возможностями реализации этих условий обладают синтетические сверхтвердые материалы (СТМ) на основе алмаза и плотных модификаций нитрида бора. Широкое применение СТМ и организация массового производства из них режущего, выглаживающего, волочильного, бурового и мерительного инструмента потребовало разработки высокопроизводительных и прецизионных методов современной технологии их обработки.

В монографии излагается методология результатов комплексного теоретико-экспериментального изучения процесса шлифования как проявления приспособляемости взаимодействующих поверхностей, и разработанным на этой базе высокоэффективными рабочими процессами, а также экспертной системы исследуемого процесса. Методологической основой работы является трехмерное (3D) теоретическое и экспериментальное исследование топографических, структурно-фазовых и энергетических аспектов приспособляемости взаимодействующих элементов, базирующееся на методах лазерного сканирования рабочей поверхности круга и обрабатываемого материала, и теоретическом изучении 3D напряженно-деформированного состояния зоны шлифования.

Применительно к обработке СТМ актуальность решаемой проблемы диктуется высокой трудоемкостью и низкой производительностью процесса их шлифования, большим расходом дорогостоящих алмазных зерен и, как следствие, высокой себестоимостью. Требуется повышение надежности и качества инструмента из СТМ, без чего невозможно применение его в автоматизированном производстве.



Работа выполнена на основе фундаментальных положений теории резания материалов и трибологии, предложенных новых методологических подходов к изучению процесса взаимодействия двух поверхностей и разработанных оригинальных методиках исследования процесса алмазного шлифования. Используются экспериментально-теоретические методы механики контактного разрушения, современные физические методы исследования материалов – электронно-микроскопического, рентгеноструктурного, металлографического, а также оригинальные, разработанные авторами методики: определения динамической прочности алмазных зерен, оценки уровня приспособляемости, изучения усталостно-циклического разрушения СТМ и зерен с наложением ультразвуковых колебаний, оценки коэффициента использования алмазных зерен, определения фактической площади контакта в системе «рабочая поверхность круга – СТМ», компьютерного цветометрического определения параметров РПК и дефектов на поверхности СТМ путем сканирования цветных фотографий, полученных в поляризованном свете. В работе использованы пакеты прикладных программ для метода конечных элементов (МКЭ) и др. Впервые применено 3D моделирование напряженно-деформированного состояния единой системы «СТМ – зерно – связка» методом конечных элементов, а для изучения параметров 3D топографии рабочей поверхности круга использован метод лазерного сканирования. Экспериментальные исследования проводились на модернизированных станках, специально разработанных стендах и установках с использованием современной контрольно-измерительной аппаратуры.

Впервые на основе 3D моделирования напряженно-деформированного состояния системы «обрабатываемый сверхтвердый материал – зерно – связка» предложена научно-обоснованная систематика механизмов разрушения ее элементов и определены пути направленного регулируемого воздействия на систему абразивного микрорезания, обеспечивающего управление взаимной приспособляемостью элементов «обрабатываемый материал – рабочая поверхность абразивно-алмазного инструмента». Систематика включает в себя типы взаимодействия элементов и виды их разрушения. Деление на типы взаимодействия определяется наличием или отсутствием контактирования связки алмазного инструмента с обрабатываемым материалом. Систематика разрушения элементов системы включает в себя 20 основных механизмов, определяемых типом взаимодействия. Анализ механизмов разрушения позволил выявить и обосновать положение о необходимости и возможности управления приспособляемостью в процессе шлифования.

Сформулировано и доказано научное положение о специфике топографического, структурно-фазового и энергетического аспектов приспособляемости взаимодействующих равнотвердых поверхностей при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов как эволюционном свойстве процесса, определяющем эффективность обработки. В рамках функционирования единой технической системы «обрабатываемый материал – алмазное зерно – связка» приспособляемость характеризуется тремя этапами, отражающими трансформацию механизмов разрушения элементов системы. На этой базе обоснована и доказана возможность в процессе шлифования целенаправленно трансформировать и/или стабилизировать процесс приспособляемости на любом из трех установленных ее этапов и тем самым осуществлять производительную и/или прецизионную обработку сверхтвердых материалов одним и тем же алмазным кругом заданной характеристики путем комплексного управления макро- и субмикрорельефом взаимодействующих поверхностей

Сформулировано положение об определяющей роли динамической прочности СТМ и модуля упругости металлической связки в достижении требуемого уровня интенсивности взаимного микроразрушения элементов системы «СТМ – зерно – связка» за счет увеличения силы соударения в контакте «зерно – СТМ» (в зоне шлифования), повышения прочности алмазоудержания и вероятности отслеживания анизотропии кристаллитов СТМ, что обеспечивает повышение производительности шлифования и сокращение удельного расхода алмазов.

Установлено существенное влияние анизотропии свойств кристаллитов обрабатываемого сверхтвердого материала и алмазных зерен на степень структурно-фазовой приспособляемости. К ним относятся, прежде всего, различие значений микротвердостей, износостойкости, энергии разрушения и прочности контактирующих элементов, обусловленное их ориентацией по отношению к зоне контакта. На базе 3D моделирования напряженно-деформированного состояния системы выявлено, что для повышения точности теоретических расчетов процессов разрушения элементов системы «обрабатываемый сверхтвердый материал – зерно», следует использовать не усредненные физико-механические характеристики, а наиболее характерные их значения с учетом специфики конкретной решаемой задачи. В расчетных схемах 3D моделирования для производительного или доводочного (прецизионного) шлифования следует учитывать взаимосвязь скорости круга, размеры зерен, частоты их собственных или вы-

нужденных колебаний и величину кристаллитов обрабатываемого сверхтвёрдого материала.

Впервые получены теоретические зависимости, описывающие взаимосвязь и изменение в процессе работы комплекса параметров 3D рабочей поверхности круга и разработан алгоритм определения оптимальных условий производительного и (или) прецизионного шлифования синтетических сверхтвёрдых материалов. Его основой является двухэтапный метод 3D экспериментально-теоретического определения фактической площади контакта, учитывающий субмикрорельеф алмазных зерен и обработанной поверхности, анизотропию свойств кристаллитов и алмазных зерен, упругих свойств связки круга. Определяющим параметром является давление в контакте «единичное зерно–СТМ».

Реализована возможность совмещения термодоводочной и контрольной операций при изготовлении лезвийного инструмента из СТМ путем осуществления термоактивируемой доводки при термосиловых нагрузках, превышающих создаваемые в экстремальных условиях его эксплуатации, что существенно повышает надежность лезвийного инструмента из СТМ. Разработан алгоритм и программное обеспечение для определения оптимальных условий производительного и прецизионного шлифования СТМ. Разработаны методики: определения динамической прочности алмазных зерен непосредственно в круге; усталостно-циклического разрушения СТМ и зерен с наложением ультразвуковых колебаний, определения фактической площади контакта в системе «рабочая поверхность круга–СТМ», определения и прогнозирования коэффициента использования потенциальных режущих свойств алмазных зерен при шлифовании СТМ (а.с. 1404832); определения уровня приспособляемости при шлифовании СТМ по величине тока электризации, позволяющая значительно сократить объем экспериментальных исследований и использованная в адаптивной системе управления; компьютерного цветометрического определения параметров РПК и дефектов на поверхности СТМ путем сканирования цветных фотографий, полученных в поляризованном свете. Рекомендован к использованию в производстве комплекс способов ультразвукового алмазного шлифования с адаптивным комбинированным управлением приспособляемостью и устройства для их реализации, позволяющих в 1,5 – 2 раза повысить эффективность обработки СТМ. Предложен состав материала абразивного круга с металлической связкой на основе железа или твердого сплава, имеющей максимально возможный модуль упругости для разработанных способов алмазного

шлифования СТМ с комбинированным управлением макро- и микрорельефом РПК.

На базе комплексного теоретико-экспериментального изучения 3D топографии обрабатываемой поверхности и рабочей поверхности шлифовального круга методом лазерного сканирования, моделирования напряженно-деформированного состояния 3D системы «обрабатываемый материал – рабочая поверхность абразивно-алмазного инструмента» и динамики износа ее элементов разработана экспертная система процесса шлифования, позволяющая прогнозировать и оптимизировать процесс бездефектной обработки как существующих, так и вновь создаваемых сверхтвердых материалов.

Таким образом, предложенная методология исследования процесса алмазного шлифования в трехмерном представлении открывает новые возможности в познании физической сущности процесса и определения путей его дальнейшего совершенствования.

## Глава 1

### Предпосылки изучения процесса алмазного шлифования в трехмерном (3D) представлении

В главе проведен анализ путей повышения эффективности процесса алмазного шлифования сверхтвердых материалов (СТМ), определены тенденции решения проблемы управления процессами контактного взаимодействия в условиях, когда отсутствует требуемое теорией шлифования превышение твердости материала инструмента над твердостью обрабатываемого материала, определены направления научного поиска, сформулированы цель и задачи исследования.

#### 1.1. Современные тенденции создания и эффективного применения сверхтвердых материалов

Как одну из тенденций развития материаловедения и высоких технологий в машиностроении можно назвать повышенное внимание в последние десятилетия к созданию сверхтвердых материалов. Обычно твердость соединений связывают с энергией межатомной связи (рис. 1.1) [206]. К сверхтвердым относят многие материалы с преимущественно ковалентными межатомными связями и твердостью выше твердости карбида бора (или  $> 20$  ГПа). Из десятков таких материалов наибольший интерес представляют синтетические алмазы и плотные нитриды бора, поэтому они и выбраны для исследований в данной работе. Есть все основания ожидать появления новых сверхтвердых материалов [215], в частности на основе  $C_2BN$ .

Возможность получения синтетических материалов со свойствами, близкими к природному алмазу, впервые была теоретически обоснована в работе О. И. Лейпунского в 1939 году [94].

Однако ее практическая реализация задержалась до 50 – 60-х годов, когда физика и техника высоких давлений, а также материаловедение достигли определенного уровня развития. С момента появления первых синтетических алма-

**Примечание [V1]:** Стр: 17  
[a№3254] Шафрановский И.И. Алмазы.  
- М.: Наука, 1964. - 173 с. {Book: Date  
31/08/02 Time 16:57:38}

**Примечание [V2]:** Стр: 17  
[a№460] Dornfeld, D., Liu, J.J.B., 1993,  
Abrasive Texturing and Burnishing Process  
Monitoring Using Acoustic Emission, An-  
nals of CIRP, 42/1: 397-400. {Book: Date  
31/08/02 Time 17:20:36}

**Примечание [V3]:** Стр: 17  
[a№3315] Лейпунский О.И. Об ис-  
кусственных алмазах. -Успехи химии,  
1939, вып. 8, с.1519-1534. {Book: Date  
18/08/02 Time 14:36:31}

зов (1953 г. – Швеция, 1954 г. – США, 1960 г. – СССР) исследования в этой области в нашей стране и за рубежом были направлены на получение крупных монокристаллов и поликристаллических образований. Вторым путем на современном этапе оказался более результативным в научном, техническом и экономическом плане.

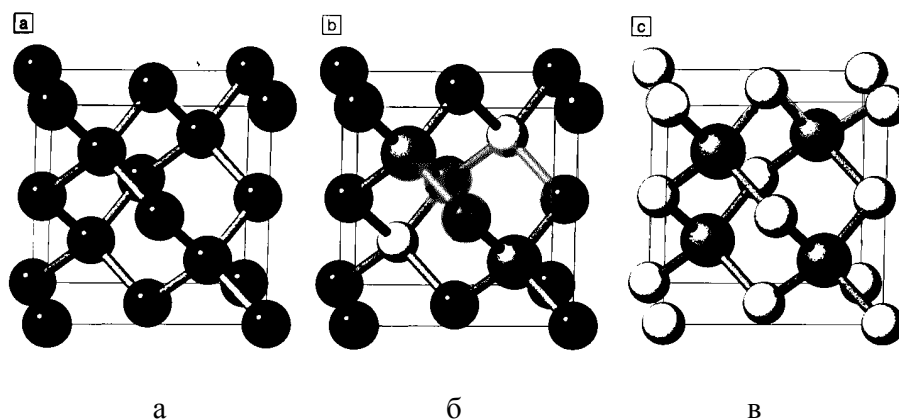


Рис. 1.1. Графическое представление структуры алмаза (а), C<sub>2</sub>BN (б) и кубического нитрида бора (в) с серыми, белыми и черными сферами, представляющими собой атомы углерода, бора и водорода соответственно

В 1963 г. под руководством выдающегося советского физика, академика Верещагина Д. Ф. на кафедре физики и химии высоких давлений Московского государственного университета совместно с институтом физики высоких давлений АН СССР при определенных условиях, характеризующихся высокими давлениями и температурой, удалось впервые, используя металл в качестве катализатора, получить синтетический поликристаллический алмаз типа баллас (АСБ). Продукт синтеза имел форму шара, величиной около 6 – 6.5 мм. Позднее в Институте физики высоких давлений АН СССР также под руководством академика Верещагина Л. Ф. была синтезирована другая разновидность поликристаллического алмаза-карбонадо (АСПК), в форме цилиндра [21]. Эти работы положили начало созданию принципиально новой группы синтетических сверхтвердых материалов (СТМ), сразу же нашедших широкое применение в различных отраслях народного хозяйства. В короткий срок – до трех лет – в стране была создана специализированная подотрасль по широкомасштабному производству СТМ и инструмента из них. Практическим результатам здесь

**Примечание [V4]:** Стр: 18  
[a№3313] Верещагин Л.Ф.  
Синтетические алмазы и гидроэкструзия.  
- М.: Наука, 1982. - 328 с. {Book: Date  
18/08/02 Time 14:38:09}

предшествовала интенсивная разработка научных основ физико-химического синтеза и спекания СТМ советскими учеными Г. М. Безруковым, А. В. Бочко, А. И. Бутузовым, В. И. Вепринцевым, Б. В. Дерягиным, Я. А. Калашниковым, Ю. С. Коняевым, А. В. Курдюмовым, А. М. Мазуренко, Н. В. Новиковым, В. И. Трофимовым, Д. В. Федосеевым, Н. Е. Филоненко, И. Н. Францевичем, А. А. Шульженко, Е. Н. Яковлевым и др., а также зарубежными исследователями Банди, Вахатеуки, Венторфом и др.

Наша обработка информации по отечественным и зарубежным источникам показала, что количество публикаций по этим вопросам возросло с 1960 года по 2000 год в тысячи раз и тенденция эта сохраняется в настоящее время.

Проблема создания и широкого использования СТМ заняла важное место в государственных планах и исследованиях таких научных центров: ИФВД, ИСМ НАН Украины, ИПМ НАН Украины, ВНИИ Алмаз, ВНИИАШ, ВНИИ, ВНИИТС, многих политехнических вузов в Киеве, Харькове, Одессе, Тбилиси, Ленинграде, Куйбышеве, Тольятти и др. Этой проблемой занимались такие ведущие ученые, как А. А. Аваков, Н. К. Беззубенко, Г. В. Бокучава, А. В. Бочко, Л. Ф. Верещагин, Ю. Н. Внуков, А. И. Грабченко, Г. И. Грановский, О. Н. Григорьев, Э. И. Гриценко, Л. Н. Девин, Н. Б. Демкин, С. Н. Дуб, В. В. Запорожец, И. П. Захаренко, Ю. Г. Кабалдин, Я. А. Калашников, В. В. Коломиец, Ю. С. Коняев, Б. И. Костецкий, Г. И. Костюк, И. В. Крагельский, Я. Кундрак, В. И. Лавриненко, Ф. Лиерат, Т. Н. Лолодзе, А. Л. Майстренко, А. Мамалис, П. Г. Матюха, Е. Н. Маслов, Л. Л. Мишнаевский, Ю. А. Муковоз, Н. В. Новиков, А. Н. Резников, О. А. Розенберг, М. Ф. Семко, М. М. Тененбаум, М. Д. Узунян, Ю. Д. Филатов, И. Н. Францевич, А. А. Шепелев, М. М. Хрущев, А. В. Якимов, Ф. Я. Якубов, П. И. Ящерицын и другие.

## 1.2. Общая характеристика сверхтвердых материалов (СТМ)

На протяжении последних 25 – 40 лет «алмазная проблема» устойчиво привлекает внимание многих исследователей, институтов Академии наук, отраслевых НИИ, проектно-конструкторских организаций, заводов-изготовителей сверхтвердых материалов и инструмента и предприятий потребителей. Только в 1965 – 1990 г.г. в работах по координационным планам по этой проблеме участвовало более 300 организаций.

Появлялись все новые и новые марки СТМ. Рациональный, научно-обоснованный выбор затруднялся не только ограниченной информацией, но и тем, что широко рекламируемые результаты часто получались в несопоставимых условиях.

Впервые как самостоятельная группа обрабатываемых инструментальных материалов СТМ были рассмотрены в работах научной школы М. Ф. Семко. В них было обращено внимание на принципиальную важность структурного аспекта при анализе свойств и определении областей применения тех или иных марок СТМ.

Подчеркивая важность различий в структурном состоянии СТМ, авторы [170] отдали предпочтение в качестве критериев классификации способам их получения. Основанные на использовании высоких давлений и температур, эти методы отличаются численными значениями указанных параметров, базовым исходным сырьем и составом добавляемых примесей (например, катализаторов).

Не отрицая правомерности такого подхода, прежде всего потому, что способ получения, в сочетании с исходным материалом, определяет и структурное состояние продукта синтеза, обратим внимание на то, что основа – алмаз или нитрид бора – и структуры СТМ являются для изготовителя и потребителя инструмента определяющим критерием. Именно эти характеристики являются главными при выборе области и условий эффективного использования СТМ. В соответствии с предложенной классификацией все СТМ разделены на 5 групп [165]: 1 группа – синтетические поликристаллические материалы на основе алмаза – СПА; 2 группа – синтетические поликристаллические материалы на основе нитрида бора – СПНБ; 3 группа – синтетические поликристаллические композиционные материалы – СПКМ; 4 группа – синтетические поликристаллические двухслойные композиционные материалы с рабочим слоем из алмаза – СПДКА; 5 группа – синтетические поликристаллические двухслойные композиционные материалы с рабочим слоем из нитридов бора – СПДКНБ.

Основные физико-механические свойства и характеристики заготовок из СТМ приведены в [67, 120, 126, 165].

Алмазные поликристаллы (первая группа) получают прямым синтезом из чистого графита в присутствии металла-катализатора воздействием давлением порядка 80 кбар и температурой около 1200°C (АСБ, АСПК, АОФ, АКМ), а также спеканием мелких алмазных порошков в однофазный графит – (мегадаймонд) или со связующим, т. е. «второй» фазой (СВ, СВС, алмет и др.).

**Примечание [V5]:** Стр: 20  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 18/08/02 Time 14:43:34}

**Примечание [V6]:** Стр: 20  
[a№1092] Синтетические сверхтвердые материалы: В 3 т. / Редкол: Н.В. Новиков... - Киев: Наук. думка, 1986. - Т.3: Применение ССМ. - 278 с. {Book: Date 18/08/02 Time 14:52:11}

**Примечание [V7]:** Стр: 20  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 18/08/02 Time 14:53:55}

**Примечание [V8]:** Стр: 20  
[a№3311] Инструменты из сверхтвердых материалов: Учебное пособие / Под ред. Н.В. Новикова. - Киев: ИСМ НАНУ, 2002. - 528 с. {Book: Date 01/09/02 Time 19:06:26}

**Примечание [V9]:** Стр: 20  
[a№3027] Новиков Н.В., Кислый П.С., Шульженко А. А. и др. Некоторые свойства кубонита новой марки // Сверхтвердые материалы. - 1980. - № 3. - С. 17-18. {Book: Date 02/09/02 Time 15:17:48}

**Примечание [V10]:** Стр: 20  
[a№3014] Новиков Н.В., Шульженко А. А. Новые сверхтвердые материалы и их применение в промышленности // Сверхтвердые материалы. - 1987. - № 5. С. 9-14. {Book: Date 02/09/02 Time 14:46:37}

**Примечание [V11]:** Стр: 20  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 01/09/02 Time 19:06:02}



Алмазы типа АСБ и АСПК идентичны по структуре и внешнему виду природным аналогам: балласу и карбонадо. Кристаллиты по сечению образца в центре более мелкие, чем на периферии. Их величина по данным [168] находится в пределах 10 ... 300 мкм. Поверхность большинства кристаллитов алмаза (АСБ) сложена комбинацией форм куба (100), октаэдра (111) и тетрагексаэдра (210) с примерно одинаковым развитием площади граней. Поликристаллы АСПК имеют аналогичную, но более тонкозернистую структуру. Меньшие размеры их зерен: по данным [160] они достигают 0,2 мм, имеют меньше дефектов, что позволяет характеризовать карбонадо как прочно сцементированную массу достаточно совершенных кристаллитов. Структурные особенности этих поликристаллов, в частности размер зерен, величина и концентрация пор, трещин, плотность дислокаций обусловлены морфологическими особенностями исходного сырья (графита) и параметрами режимов синтеза.

У балласов, изготовленных из крупнозернистого графита, наблюдается четкая замкнутость границ, имеются поры размером до 20 мкм и трещины, явно выражена текстурированность зерен: мелкозернистые графиты обуславливают более мелкозернистую структуру поликристалла, отсутствие трещин и слабое текстурирование [22, 229, 239].

Важной особенностью внутреннего строения поликристаллических алмазов типа АСБ и АСПК является наличие в них различных включений, оказывающих значительное влияние на физико-механические свойства алмазов. Это – не прореагировавший графит, металл - катализатор, его карбиды, окислы и твердый раствор металл-углерод. Размер включений достигает 0,5 – 10 мкм [127].

Исследованиями [99] установлено два вида дисперсных металлических включений, различающихся по своему составу: ориентированные, закономерно сопряженные с решеткой алмаза и заключенные внутри кристаллитов, и неориентированные, расположенные по границам между зерен [110, 120, 217]. Количество неориентированных включений составляет 1 – 8 %, а ориентированных 5 % [127].

Исследования, выполненные нами с помощью рентгеновского микроанализатора «PV9800EDAX EDS», показали, что в различных сечениях образца концентрация металлофазы, в частности никеля, определяемая как отношение площади металла к размеру электронной площадки, примерно постоянная и для АСБ и АСПК соответственно составляет 1,8 ... 2,2 % и 1,37 ... 1,5 % [193].

**Примечание [V12]:** Стр: 21

[a№645] Синтетические сверхтвердые материалы: В 3 т. / Редкол: Н.В. Новиков... - Киев: Наук. думка, 1986. - Т.1: Синтез CCM. - 278 с. {Book: Date 18/08/02 Time 15:01:14}

**Примечание [V13]:** Стр: 21

[a№3323] Верещагин Л.Ф., Яковлев Е.Н., Варфоломеева Т.Д. др. Синтез алмазов типа карбонадо // Докл. АН СССР. - Том 185. - № 3. - 1969. - С. 555-556. {Book: Date 18/08/02 Time 17:45:29}

**Примечание [V14]:** Стр: 21

[a№3322] Верещагин Л.Ф., Калашников Я.А., Шалимов М.Д. О форме кристаллов алмаза в синтетических балассах // Докл. АН СССР. - Том 217. - 1974. № 1. - С. 70-72. {Book: Date 18/08/02 Time 17:34:03}

**Примечание [V15]:** Стр: 21

[a№3069] Phaal S., Woolds G. X-ray and metal inclusions in synthetic diamond // Nature. - 1966, 212. - P. 1227-1229. {Book: Date 02/09/02 Time 15:43:34}

**Примечание [V16]:** Стр: 21

[a№3143] Teter D. Computational Alchemy: The Search for New Superhard Materials // MRS Bulletin, January. - 1998. - Vol. 23. - № 1. - P. 22-27. {Book: Date 02/09/02 Time 15:46:53}

**Примечание [V17]:** Стр: 21

[a№3317] Образование искусственным путем алмаза типа баллас. Калашников Я.А., Верещагин Л.Ф., Феклиев Е.М. и др. // ДАН СССР, 1967. - Том 172, № 1. - С. 76-78. {Book: Date 18/08/02 Time ...}

**Примечание [V18]:** Стр: 21

[a№3024] Черемской П.Г., Гладких Л.И., Швецова З.И., Грабченко А.И., Красильников Е.В. Локальные неоднородности ...

**Примечание [V19]:** Стр: 21

[a№866] Миркин Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. - М.: Металлургия, 1957. - 56 ...

**Примечание [V20]:** Стр: 21

[a№3027] Новиков Н.В., Кислый П.С., Шульженко А. А. и др. Некоторые свойства кубонита новой марки // Све ...

**Примечание [V21]:** Стр: 21

[a№3177] Howes V.R. Physical properties of diamond // Oxford: Clarendon. - 1965. - P. 174-183. {Book: Date 02/09/02 Time ...}

**Примечание [V22]:** Стр: 21

[a№3317] Образование искусственным путем алмаза типа баллас. Калашников Я.А., Верещагин Л.Ф., Феклиев Е.М. ...

**Примечание [V23]:** Стр: 21

[a№3194] Федорович В.А., Пупань Л.И. Электронно-микроскопическое исследование поверхности алмазных зерен ш ...

Структура алмазов типа СВ – двухфазная. Межкристаллитные границы нечеткие даже после травления. Вторая фаза располагается преимущественно либо в виде тончайших прожилок между кристаллитами алмаза, либо в виде скоплений неправильной формы в межзеренном пространстве. Общее количество примесей не превышает 2 % [73].

Однако, доля металлической связки может быть существенно большей, если спекаются порошки после пропитки никелем, кобальтом, железом, марганцем, хромом и др., ломающими угол смачивания алмаза.

Предел прочности указанных материалов на сжатие, определяемый при одноосном статическом нагружении, характеризуется широким интервалом значений от 0.2 – 0.4 ГПа у балласа до 5 и даже 9 ГПа у дисмита и СВ. По возрастанию его величины алмазные поликристаллы располагаются следующим образом: АСБ, АСПК, СВ и дисмит. Это обусловлено изменением их внутреннего строения, в частности, уменьшением размеров кристаллитов, а также количеством примесных включений и неоднородностью их распределения [10, 102, 218].

Имеется значительное превышение динамической прочности алмазов АСБ и АСПК над соответствующим показателем природных алмазов, в том числе – высококачественных IV группы «а» [7]. Существует корреляционная связь между абразивной способностью с одной стороны, и микротвердостью и плотностью, с другой. По данным [163] с увеличением микротвердости от 5000 до 11400 кгс/мм<sup>2</sup> абразивная способность синтетического балласа возрастает от 10 до 151 см<sup>3</sup>/мг. С повышением плотности образцов АСПК абразивная способность их резко падает. При этом ее максимальное значение наблюдается у поликристаллов с плотностью 3.72 ... 3.76 г/см<sup>3</sup> [162].

Термостойкость, т. е. температура, при которой наступает потеря прочности, абразивной способности и веса, для таких алмазов определяется диапазоном 600°– 1000°С. Указанное изменение наступает вследствие окисления или графитизации алмазных зерен, т. е. обратного перехода алмаза в графит. Интенсивность такого процесса зависит от состава окружающей среды, величины внешнего давления, времени выдержки при данной температуре, степени совершенства кристаллитов и количества примесей [168].

Коэффициент трения является фактором, в значительной мере определяющим характер контактных явлений при обработке инструментами их СТМ. У алмазов, синтезируемых из графитов, его величина меньше, чем у твердых

**Примечание [V24]:** Стр: 22

[a№3174] Кабалдин Ю.Г. Структура, прочность и износостойкость композиционных инструментальных материалов. - Владивосток: Дальнаука, 1996. - 183 с. {Book: Date 17/08/02 Time 16:14:00}

**Примечание [V25]:** Стр: 22

[a№3108] Бакуль В.Н. Поликристаллические сверхтвердые материалы // Синтетические алмазы. - 1975. - № 4. - С. 17-22. {Book: Date 02/09/02 Time 15:28:57}

**Примечание [V26]:** Стр: 22

[a№3238] Манжар В.А. Оценка качества поликристаллов на основе алмаза // Инструментальный світ. - Науково-технічний рекламно-інформаційний журнал. - Київ. - 2001. - №12. - С.27-28. {Book: Date 02/09/02 Time 15:26:45}

**Примечание [V27]:** Стр: 22

[a№3178] Howes V.R. The critical stress for the production of pressure crack figures on diamond faces // Proc. Phys. Soc. London. - 1959. - Vol. 74. - № 475. - P. 48-52. {Book: Date 02/09/02 Time 15:39:41}

**Примечание [V28]:** Стр: 22

[a№247] Устройство для ударных испытаний материалов: А.с. 1422095 СССР, МКИ G 01 N 3/30, 3/06. / Н.В. Новиков, А.П. Маслов, Ю.Ф. Матяш, Л.Н. Девин, А.М. Боярунас, В.Ф. Дрожин, В.Л. Доброскок. № 4185598/25-28; Заявлено 26.01.87; Опубл. 07.09.88, Бюл. № 33. - 2 с. ил. {Book: Date 18/08/02 Time 15:21:05}

**Примечание [V29]:** Стр: 22

[a№3318] Семко М.Ф. Эффективность обработки инструментами из синтетических поликристаллов алмазов // Машиностроитель. - 1975. - № 3. - С. 36-37. {Book: Date 18/08/02 Time 16:52:07}

**Примечание [V30]:** Стр: 22

[a№3319] Семко М.Ф. Особенности процесса резания инструментами из синтетических алмазов крупных размеров // Синтетические алмазы. - 1971. - вып.6. - С. 33-35 {Book: Date 18/08/02 Time 16:58:51}

**Примечание [V31]:** Стр: 22

[a№645] Синтетические сверхтвердые материалы: В 3 т. / Редкол: Н.В. Новиков... - Киев: Наук. думка, 1986. - Т.1: Синтез ССМ. - 278 с. {Book: Date 18/08/02 Time 15:24:18}

сплавов и быстрорежущих сталей, но больше по сравнению с природными алмазами [67, 165].

Исследования В. П. Зубаря и др. [63] показывают, что коэффициент трения алмазов АСБ и АСПК при широком интервале изменения свойств контактирующих с ними материалов находится в пределах 0.1 – 0.3 [27, 28, 170].

Повышение значения  $\mu$  в направлении природный алмаз – АСПК – АСБ обусловлено их структурными особенностями.

К числу таковых в первую очередь следует отнести различия количества включения металлофазы и состояния, в частности, микрогеометрии поверхности. Собственный коэффициент трения у металла-катализатора с алмазом выше, чем у алмаза по алмазу и, следовательно, с увеличением его содержания в поликристалле значение  $\mu$  возрастает. Наличие микронеровностей пор и трещин на поверхности синтетических алмазов, обусловленных их внутренним строением, способствует накоплению в них частиц сопряженного металла. В результате трения однородных металлов показатель  $\mu$  также возрастает.

Известно, что для алмаза характерно изменение сил трения в зависимости от ориентации кристаллитов. Учитывая хаотическое расположение кристаллитов в синтетических алмазах, следует считать повышение их коэффициента трения и как следствие того, что с металлами одновременно контактирует и «мягкие» и «твердые» плоскости. Роль анизотропии физико-механических свойств кристаллитов СТМ и алмазных зерен будет рассмотрена в п. 1.3.

Синтетические поликристаллические алмазы на основе плотных модификаций нитридов бора (вторая группа) получают путем синтеза из гексагонального нитрида бора в присутствии растворителя  $\text{BN}_\Gamma \rightarrow \text{BN}_{\text{сф}}$  (эльбор) прямым переходом гексагональной модификации в кубическую. Белбор, исмит-2 – превращением вюрцитоподобной модификации в кубическую  $\text{BN}_\text{в} \rightarrow \text{BN}_{\text{сф}}$  с различной полнотой перехода, зависящей от параметров спекания (гексанит-Р, ПТНБ-ИК1, исмит-3); спеканием порошков КНБ с активирующими добавками (композит 05-ИТ, киборит и др.) [48, 128, 149].

Поликристаллы на основе кубической модификации нитрида бора (КНБ) типа эльбор-Р имеет мелкозернистую структуру, доминирующей фазой которой являются мелкие зерна КНБ, сросшиеся и взаимно проросшие с образованием прочного агрегата. Имеющиеся примеси равномерно распределены по объему образца [129, 166]. Наряду с основной кубической модификацией  $\beta$  – BN в них возможно частичное содержание непрореагировавшего гексагонального нитри-

**Примечание [V32]:** Стр: 23

[a№3311] Инструменты из сверхтвердых материалов: Учебное пособие / Под ред. Н.В. Новикова. - Киев: ИСМ НАНУ, 2002. - 528 с. {Book: Date 18/08/02 Time 15:25:14}

**Примечание [V33]:** Стр: 23

[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 18/08/02 Time 15:25:51}

**Примечание [V34]:** Стр: 23

[a№3314] Зубарь В.П., Крюков В.К., Алмосов В.В. Исследование особенностей трения синтетических поликристаллических алмазов с конструкционными материалами // Резание и инструмент. - Харьков: ХПИ, вып. 13. - 1975 - С. 54-58. {Book: Date 17/08/02 Time 16:23:19}

**Примечание [V35]:** Стр: 23

[a№1086] Внуков Ю.Н., Грабченко А.И. Физические представления о трении и износе инструментальных материалов для режущих инструментов «Muszaki ...

**Примечание [V36]:** Стр: 23

[a№1085] Внуков Ю.Н., Дюбнер Л., Пансков А. Виды трения и износа при точении инструментами с покрытиями // Резание и инструмент в технологическ ...

**Примечание [V37]:** Стр: 23

[a№1092] Синтетические сверхтвердые материалы: В 3 т. / Редкол: Н.В. Новиков... - Киев: Наук. думка, 1986. - Т.3: Применение ССМ. - 278 с. {Book: Dat ...

**Примечание [V38]:** Стр: 23

[a№3168] Девин Л.Н., Романенко В.В. К определению трещиностойкости композитов на основе твердого сплава // Сверхтвердые материалы. - 1982. - № ...

**Примечание [V39]:** Стр: 23

[a№3109] Курдюмов А.В., Олейник Г.С., Пилиякевич А.Н. и др. О начальных стадиях превращения графитоподобной модификации нитрида бора в офалери ...

**Примечание [V40]:** Стр: 23

[a№3004] Разрушение: Пер. с англ. В 7 т. / Под ред. Г. Либовица. - М.: Мир, Машиностроение, 1976. - Т.7: Разрушение неметаллов и композитных материалов ...

**Примечание [V41]:** Стр: 23

[a№3320] Палатник Л.С., Гладких Л.И., Фукс М.Я. и др. О структуре поликристаллов нитрида бора после спекания под давлением // Синтетические алма ...

**Примечание [V42]:** Стр: 23

[a№3321] Сенькин Г.А., Гомон Т.О., Лысанов В.С. Влияние механических свойств заготовок эльбора-Р на работоспособность режущего инструмента // ...

да бора  $\alpha$  – BN. Размер зерен и включений сопутствующих фаз около 30 мкм, пористость равномерная. Белбор и другие СПНБ, получаемые без внешних катализаторов, отличаются однородностью структуры, высокой теплостойкостью, стабильностью свойств.

Структура ПТНБ в соответствии с составом исходного сырья представляет собой преимущественно кубическую модификацию нитрида бора с размером частиц 3 и 5 мкм и вюрцитоподобную в качестве связующего. Изменение количественного соотношения вюрцитоподобного и кубического нитрида бора в исходной смеси приводит к изменению эксплуатационных свойств поликристаллов.

Гексанит-Р характеризуется тонкозернистой, скрытно кристаллической, многофазной структурой. Кроме вюрцитной ( $\text{BN}_\text{в}$ ) в нем содержится в широком диапазоне концентраций фаза со структурой сфалерита ( $\text{BN}_\text{сф}$ ) и возможна также графитоподобная модификация ( $\text{BN}_\text{г}$ ) [29,130]. Размер частиц основной фазы менее 1 мкм. Включения и примеси размером 10 – 15 мкм равномерно распределены по всему объему.

Характерной особенностью и важным преимуществом сверхтвердых материалов этой группы является их химическая инертность к черным металлам. Микротвердость находится в пределах 30 – 40 ГПа, убывая в последовательности эльбор-Р, ПТНБ, гексанит-Р. В этом же направлении уменьшается и хрупкость поликристаллов, т. е. возрастает их динамическая прочность [100]. Сопоставляя эти данные с особенностями структуры, можно предположить, что указанное уменьшение твердости и повышение вязкости поликристаллов связано с увеличением в их составе процентного содержания пластичной фазы  $\text{BN}_\text{в}$  [29]. По теплопроводности эльбор-Р примерно вдвое ниже природного алмаза и во столько же превосходит его по термостойкости [100].

Синтетические поликристаллические композиционные материалы (третья группа) с равномерным распределением по объему неоднородных веществ получают спеканием смеси порошков алмаза с кубическим нитридом бора (СВАБ, компакс); порошка алмаза с гексагональным нитридом бора (ПКНБАС); порошка кубического нитрида бора с алмазом, окислами, карбидами; синтезом из графитоподобного нитрида бора с добавлением кубического нитрида бора,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_4\text{SiO}_2$ , тугоплавких металлов; армированием вюрцитоподобного нитрида бора нитевидными кристаллами  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; нитрида кремния и др. волокнистых материалов [17, 116, 122, 197] и др.

**Примечание [V43]:** Стр: 24  
[a№3019] Бочко А.В., Лавренко В.А., Примачук В.Л., Проценко Т.Г. Окисление поликристаллов гексанита-Р различного фазового состава // Сверхтвердые материалы. - 1986. - № 1. - С. 16-18. {Book: Date 18/08/02 Time 15:35:57}

**Примечание [V44]:** Стр: 24  
[a№417] Воронков В.И. Высокопроизводительное шлифование быстрорежущих сталей кругами из гексанита и эльбора: Автореф. дис... канд. техн. наук. - Саратов, 1986. - 25 с. {Book: Date 18/08/02 Time 15:35:39}

**Примечание [V45]:** Стр: 24  
[a№656] Лысанов В.С. Эльбор в машиностроении. - Л.: Машиностроение, 1978. - 280 с. {Book: Date 18/08/02 Time 15:40:59}

**Примечание [V46]:** Стр: 24  
[a№417] Воронков В.И. Высокопроизводительное шлифование быстрорежущих сталей кругами из гексанита и эльбора: Автореф. дис... канд. техн. наук. - Саратов, 1986. - 25 с. {Book: Date 18/08/02 Time 15:42:37}

**Примечание [V47]:** Стр: 24  
[a№656] Лысанов В.С. Эльбор в машиностроении. - Л.: Машиностроение, 1978. - 280 с. {Book: Date 31/08/02 Time 23:28:55}

**Примечание [V48]:** Стр: 24  
[a№3023] Будяк А.А., Кацай М.Я. Оценка качества шлифпорошков из синтетических алмазов с помощью обобщенного критерия термостойкости // Сверхтвердые материалы. - 1985. - № 3. - С. 33-35. {Book: Date 02/09/02 Time 16:22:22}

**Примечание [V49]:** Стр: 24  
[a№3073] Никитин Ю.И., Белик В.Д. Исследование динамики разрушения алмазных шлифпорошков при свободном и стесненном ударах // Сверхтвердые материалы. - 1994. - № 4. - С. 48-52. {Book: Date 02/09/02 Time 16:20:38}

**Примечание [V50]:** Стр: 24  
[a№3057] Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н. Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов. - Киев: Наук. думка, 1993. - 220 с. {Book: Date 18/08/02 Time 15:49:09}

**Примечание [V51]:** Стр: 24  
[a№3012] Характеристики монокристаллических алмазных шлифпорошков марок АС100, АС125, АС160 // Сверхтвердые материалы. - 1990. - № 4. С. 43-48. {Book: Date 02/09/02 Time 16:21:08}



Композит, содержащий 85 – 97 % BN, 5 – 2 % окислов натрия, 10 – 1 % тугоплавких соединений (алмаз, корунд, карбид кремния и др.) имеет плотную структуру, сцементированную взаимопроросшими кристаллитами кубического нитрида бора. Физико-механические свойства можно регулировать, изменяя количество и фазовый состав добавок тугоплавких соединений [169]. Эта группа СТМ весьма перспективна.

Общим для СТМ пятой и шестой группы является то, что они представляют двухслойную композицию, состоящую из слоя сверхтвердого материала и подложки из твердого сплава или других материалов обычной твердости [20, 56, 175]. Спекание порошков СТМ производится при высоких температурах и давлении, что обеспечивает наряду с другими технологическими приемами прочное сцепление слоев. Наличие подложки придает повышенную прочность заготовке, а относительно небольшая толщина слоя сверхтвердого материала (0.5 – 2 мм) делает их более экономичными.

Структура и свойства материала рабочего слоя соответствуют структуре однородных по объему СТМ, получаемых методом спекания, т. е. отнесенным по нашей классификации к первой и второй группам. У СТМ четвертой группы рабочий слой сформирован на алмазной основе. Это ДАП, диамет, СВНБ, стра-топакс, компакс, полиблок, синдит [115].

У СТМ пятой группы рабочий слой сформирован на основе плотных модификаций нитридов бора.

Следует подчеркнуть, что соотношение объемов СТМ указанных пяти групп в общем выпуске сверхтвердых материалов в нашей стране не вполне соответствует потенциальным возможностям конкретного сверхтвердого материала в инструменте и, естественно, реальным потребителям. Зарубежные фирмы отдают заметное предпочтение СТМ четвертой и пятой групп, т. е. двухслойным композиционным материалам.

### 1.3. Анизотропия физико-механических свойств СТМ и алмазных зерен

Технология обработки природных алмазов в бриллианты основана на использовании анизотропии их физико-механических свойств [60]. А поскольку кристаллиты (монокристаллы) в СТМ и алмазные зерна (монокристаллы) также обладают анизотропией свойств и могут быть ориентированы к зоне контакта

**Примечание [V52]:** Стр: 25

[a№1091] Синтетические сверхтвердые материалы: В 3 т. / Редкол: Н.В. Новиков... - Киев: Наук. думка, 1986. - Т.2: Композиционные инструментальные СТМ. - 262 с. {Book: Date 18/08/02 Time 15:50:50}

**Примечание [V53]:** Стр: 25

[a№666] Верещагин В.А., Журавлев В.В. Композиционные алмазосодержащие материалы и покрытия. - Минск: Наука, Техника, 1991. - 208 с. {Book: Date 02/09/02 Time 16:25:41}

**Примечание [V54]:** Стр: 25

[a№5021] Драевский А.И. Формирование композиционных абразивных материалов инструментального назначения с эндотермическими свойствами: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.02.01 / Запорож. гос. техн. ун-т. - Запорожье, 1995. - 21 с. {Book: Date 02/09/02 Time 16:24:18}

**Примечание [V55]:** Стр: 25

[a№3009] Степанов И.Г., Кулаковский В.Н., Бондарь И.В. Особенности усталостного разрушения композиционных алмазосодержащих материалов, полученных методом пропитки // Сверхтвердые материалы. - 1994. - № 1. - С. 44-48. {Book: Date 02/09/02 Time 16:25:01}

**Примечание [V56]:** Стр: 25

[a№272] Никитин Ю.И. Технология изготовления и контроль качества алмазных порошков. - К.: Наук. думка, 1984. - 264 с. {Book: Date 02/09/02 Time 16:30:03}

**Примечание [V57]:** Стр: 25

[a№3061] Епифанов В.И., Песина А.Я., Зыков Л.В. Технология обработки алмазов в бриллианты. - М.: Высш. шк., 1984. - 319 с. {Book: Date 02/09/02 Time 20:38:07}

как «мягкой», так и «твердой» гранью, то процесс шлифования СТМ следует рассматривать как процесс высокоскоростного контактного взаимодействия различных пар «мягких» и «твердых» кристаллитов [44, 209].

В зависимости от принятого направления, в частности, при шлифовании плоской сетки куба, шлифуемость изменяется более чем в 100 раз [242]. Модуль Юнга имеет значение  $E(100) = 1050$ ,  $E(110) = 160$  и  $E(111) = 200$  ГПа [2]. Существенно различается и энергия разрушения вдоль различных кристаллографических плоскостей. По данным [165] отношение энергий для кристаллографических плоскостей равны соответственно:  $\{111\} - 1.000$ ;  $\{110\} - 1.225$ ;  $\{100\} - 1.732$ , т. е. различается более чем в 1.7 раза. С учетом наличия корреляции между микротвердостью и обрабатываемостью хрупких неметаллических материалов [44] показано, что в зависимости от условий шлифования скорость съема алмаза при изменении направления обработки одной плоскости может изменяться в несколько десятков раз [60]. Такие особенности эффективно используются при ориентации кристалла природного алмаза в лезвийном инструменте. Использование анизотропии свойств алмаза для повышения износостойкости алмазных резцов показано в работе [58].

Известно, что монокристаллы проявляют анизотропию в микротвердости при испытаниях давлением и царапанием. Монокристаллы алмаза обладают также анизотропией интенсивности окисления по различным кристаллографическим направлениям. По уменьшению скорости окисления грани располагаются в ряд  $\{111\} > \{100\} > \{110\}$ . Так, при температуре 1073°K скорость окисления грани  $\{100\}$  в 1.5 раза, а грани  $\{111\}$  в 1.8 раза больше чем грани  $\{110\}$  [57, 90, 119].

Существенно различается также и скорость графитизации в различных кристаллографических направлениях. Интенсивнее идет графитизация грани  $\{110\}$ , наименьшая интенсивность – для грани  $\{001\}$  [195]. Причем, скорость графитизации полированной площадки износа в 2 раза меньше, чем у шероховатой [169]. Т. Н. Лоладзе и Г. В. Бокучава [98] показали, что потеря массы (скорость диффузии) алмаза с плоскости  $\{100\}$  происходит более интенсивно, чем с грани  $\{111\}$ . Причем показано, что это справедливо как для природных, так и для синтетических монокристаллов алмазов.

По данным Полякова В. П. [139] микротвердость различных граней алмаза колеблется от 50 ГПа для граней куба до 90 – 100 ГПа для граней октаэдра, т. е. различается в два раза.

**Примечание [V58]:** Стр: 26  
[a№3064] Григорьева Л.Ф. Влияние некоторых физико-механических свойств кристаллов на процесс шлифовки // Инженерно-физический журнал. - 1960. - № 2. - С. 36-40. {Book: Date 02/09/02 Time 16:36:01}

**Примечание [V59]:** Стр: 26  
[a№3303] Щукин Е.Д. Понижение поверхностной энергии и изменение механических свойств твердых тел под влиянием окружающей среды // Физико-механическая механика материалов. - 1976. - № 1. - С. 25-31 {Book: Date 02/09/02 Time 16:35:17}

**Примечание [V60]:** Стр: 26  
[a№33062] Wakatsuki M., Ichinose K., Aoki T. Synthesis of polycrystalline cubic // B.N. - Material Research Bulletin. - 1972. Vol.7, P. 999-1004. {Book: Date 02/09/02 Time 16:35:17}

**Примечание [V61]:** Стр: 26  
[a№3063] Алмаз : Справочник / Д.В. Федосеев, Н.В. Новиков, А.С. ...

**Примечание [V62]:** Стр: 26  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное ...

**Примечание [V63]:** Стр: 26  
[a№3064] Григорьева Л.Ф. Влияние некоторых физико-механических ...

**Примечание [V64]:** Стр: 26  
[a№3061] Епифанов В.И., Песина А.Я., Зыков Л.В. Технология обработки алмаза ...

**Примечание [V65]:** Стр: 26  
[a№3065] Дятлов Ю.А. Напряжения в алмазном режущем элементе в зависи ...

**Примечание [V66]:** Стр: 26  
[a№3066] Кулакова И.И., Руденко А.П. Скорости каталитического окисления ...

**Примечание [V67]:** Стр: 26  
[a№3235] Новиков Н.В., ДубС.Н., Мальнев В.И. Микротвердос ...

**Примечание [V68]:** Стр: 26  
[a№3111] Дуб С.Н. Методика испытаний на трещиностойкость монокристаллов ...

**Примечание [V69]:** Стр: 26  
[a№3067] Физические свойства алмаза: Справочник. - Киев: Наук. думка, 198 ...

**Примечание [V70]:** Стр: 26  
[a№3068] Синтетические сверхтвердые материалы: В 3-х т. - Т.2: Композиции ...

**Примечание [V71]:** Стр: 26  
[a№280] Бокучава Г.В. Трибология процесса шлифования. - Тбилиси: Сабчот ...

**Примечание [V72]:** Стр: 26  
[a№652] Поляков В.П., Ножкина А.В., Чириков Н.В. Алмазы и сверхтвердые ...

Механизм взаимного износа – разрушения элементов «СТМ – зерно – связка» может быть следующий. В первый момент после правки круга острые зерна осуществляют либо износ – истирания «мягких» граней кристаллитов либо их скол по наиболее «слабой» плоскости грани октаэдра. Этот период характеризуется интенсивным съемом припуска и существенным износом зерен круга. По мере износа круга, увеличения количества зерен с площадками износа число их в контакте с СТМ возрастает, удельные нагрузки падают, в контакте начинают превалировать «твердые» грани как кристаллитов СТМ, так и алмазных зерен. За счет неравномерности износа «твердых» и «мягких» граней кристаллитов СТМ на обрабатываемой поверхности образуются впадины (мягкие грани) и выступы (твердые грани). При этом основным видом взаимного разрушения зерен и СТМ является истирание. По мере увеличения глубины впадин твердая грань алмазного зерна, попадая во впадину (мягкую грань кристаллита), скалывается (либо скалывает кристаллит) по наиболее слабой (для скола) грани октаэдра.

Таким образом, из зоны контакта временно удаляются контактирующие «твердые» пары и процесс несколько интенсифицируется. Очевидно, этим можно объяснить установленную авторами [147, 155] периодичность при традиционном алмазном шлифовании СТМ.

Существенная анизотропия физико-механических свойств кристаллитов СТМ и алмазных зерен будет использована при анализе особенностей процесса их взаимного микроразрушения при алмазном шлифовании СТМ.

#### 1.4. Структурные изменения в сверхтвердых материалах в условиях алмазного шлифования

С учетом того, что в процессе обработки, а также последующей эксплуатации в качестве инструмента СТМ подвергаются воздействию высоких температур и давлений, особые требования предъявляются к стабильности их структуры и механических свойств. В связи с этим является актуальным исследование влияния теплосилового воздействия на структурно-фазовое состояние сверхтвердых материалов на основе алмаза и нитрида бора. Как показал обзор литературных данных, большая часть работ посвящена анализу роли температурной обработки в изменении структуры и свойств СТМ, что, с одной стороны, обусловлено высокой тепло напряженностью процессов изготовления и

**Примечание [V73]:** Стр: 27  
[a№3042] Пыжов И.Н. Алмазное шлифование двухслойных сверхтвердых композиционных материалов: Дис... канд. техн. наук: 05.03.01.- Харьков. - 1983. - 247 с. {Book: Date 15/08/02 Time 23:37:18}

**Примечание [V74]:** Стр: 27  
[a№64] Русанов В.В. Исследование физических явлений и качества поверхности при алмазном шлифовании композиций «СТМ - сталь»: Дис... канд. техн. наук. - Харьков, 1980. - 259 с. {Book: Date 15/08/02 Time 23:36:17}

применения инструментов, а с другой – особой ролью теплового фактора в разрушении СТМ. Воздействие температуры является достаточно сложным и зависит от конкретного типа материала, его структуры, фазового состава и количества примесей. Среди общих процессов, происходящих как в СТМ на основе алмаза, так и нитрида бора, следует отметить полиморфные превращения (графитизацию), окислительные реакции, структурные переходы во включениях, субструктурные изменения, а также создание сложного напряженного состояния.

Как правило, указанные виды структурных изменений приводят к резкому разупрочнению СТМ с повышением температуры [159, 232]. По данным [101, 169] нагрев синтетических алмазов до  $T = 1273 - 1473^\circ\text{K}$  снижает их прочность в 2 – 5 раз. Исследования влияния термообработки на структуру и механические свойства поликристаллов на основе нитрида бора проводились достаточно подробно авторами [123, 130]. Установлено изменение фазового состава, структурного состояния, а также снижение механических свойств гетерофазных поликристаллов на основе нитрида бора (гексанита-Р) после различных видов термического воздействия. Основным видом структурных превращений, приводящим к существенному изменению прочностных свойств СТМ при воздействии температуры, является графитизация, то есть полиморфный переход сверхтвердых тетраэдрических фаз в деформативные слоистые структуры (образование графитоподобной модификации BN и графита), существенно отличающиеся по своим свойствам от плотных фаз нитрида бора и алмаза. Интенсивная графитизация резко разупрочняет материал. Так, присутствие BN в спеках гексанита-Р в количестве, превышающем 2 %, приводит к существенному падению вязкости разрушения и облегчению процессов образования и закритического роста трещин [93, 106]. Температура начала графитизации в СТМ зависит от их фазового состава, структурного состояния фаз, их дисперсности, а также условий нагрева. Для материалов на основе нитрида бора температура графитизации составляет 1400 – 1600°K, для алмаза – 1700 – 1800°K. С увеличением температуры происходит непрерывный рост и скорости графитизации, поскольку при этом не только увеличивается атомная подвижность, но и растет, как следует из диаграмм состояния, разность термодинамических потенциалов старой и новой фаз [199]. Процессы графитизации становятся столь сильными, что могут привести к растрескиванию образцов из-за большого объемного эффекта превращения [173]. Существуют тем не менее ситуации, при которых графитизация (в незначительных масштабах) может оказать положительный

**Примечание [V75]:** Стр: 28  
[a№654] Францевич И.Н., Гнесин Г.Г., Курдюмов А.В. и др. Сверхтвердые материалы. - Киев: Наук. думка, 1980. - 296 с. {Book: Date 31/08/02 Time 19:25:47}

**Примечание [V76]:** Стр: 28  
[a№3263] Rupp W.J. Mechanism of the Diamond Lapping Process // Applied Optics. - 1974. - № 6. - P. 1264-1269. {Book: Date 31/08/02 Time 19:24:20}

**Примечание [V77]:** Стр: 28  
[a№574] Малышев В.И., Янюшкин Ю.М. Контактные температуры при алмазной правке шлифовальных кругов // Сверхтвердые материалы. - 1986. - № 5. - с. 48-54. {Book: Date 31/08/02 Time 19:26:21}

**Примечание [V78]:** Стр: 28  
[a№1091] Синтетические сверхтвердые материалы: В 3 т. / Редкол: Н.В. Новиков... - Киев: Наук. думка, 1986. - Т.2: Композиционные инструментальные СТМ. - 262 с. {Book: Date 31/08/02 Time 19:27:28}

**Примечание [V79]:** Стр: 28  
[a№3019] Бочко А.В., Лавренко В.А., Примачук В.Л., Проценко Т.Г. Окисление поликристаллов гексанита-Р различного фазового состава // Сверхтвердые материалы. - 1986. - № 1. - С. 16-18. {Book: Date 31/08/02 Time 19:28:09}

**Примечание [V80]:** Стр: 28  
[a№3015] Шульженко А.А., Гинзбург Б.И., Ховах Н.И., Прусс А.И. Новые сверхтвердые материалы за рубежом (Обзор) // Сверхтвердые материалы. - 1987. - № 1. - С. 23-28. {Book: Date 31/08/02 Time 19:28:34}

**Примечание [V81]:** Стр: 28  
[a№3197] Лаптев В.А., Нефедов П.В., Детчуев Ю.А. Влияние прочности и термостойкости монокристаллов алмаза на работоспособность инструмента // Сверхтвердые материалы. - 1987. - № ...

**Примечание [V82]:** Стр: 28  
[a№3258] Механизм абразивного износа и структура поверхности кристаллических материалов после абразивной обработки / Д.В. Лоцко, Ю.В. Мильман, Н.М. Торчун // Поверхность. Физика, химия, ...

**Примечание [V83]:** Стр: 28  
[a№3326] Ходоровский М.Г. Исследование процесса алмазного шлифования синтетических сверхтвердых материалов: Дис... канд. техн. наук: 05.03.01. - X., 1975. - 214 с. {Book: Date 31/08/02 ...}

**Примечание [V84]:** Стр: 28  
[a№3018] Созин Ю.И., Симкин Э.С., Осипинская Т.Д. К вопросу о графитизации алмаза // Сверхтвердые материалы. - 1992. - № 4. - С. 62-64. {Book: Date 31/08/02 Time 19:29:36}



эффект на прочностные параметры материала. Например, в работе [130] отмечается увеличение твердости гексаниита-Р при отжиге (480 – 1280°K) от 59 – 66 ГПа в исходном состоянии до 83 – 88 ГПа (индентор Виккерса), что объясняется структурными изменениями материала, подавляющими низкотемпературное охрупчивание и связанное с ним снижение твердости и заключающимися в формировании выделений графита в количестве 0.2 – 0.5 %, пластичного по сравнению с фазами высокого давления. Графитизация идет на поверхности и дефектных участках материала со значительным увеличением удельного объема и, следовательно, с возникновением напряжений сжатия, затрудняющих процессы хрупкого разрушения. Следует также особо выделить роль включений в структурных превращениях в сверхтвердых поликристаллах на основе алмаза и нитрида бора при отжиге, поскольку их присутствие является скорее правилом, нежели исключением, а содержание может быть весьма существенным. Более того, даже незначительное количество примесей может вызвать весьма заметные изменения структуры и свойств, причем характер этих изменений определяется особенностями конкретного типа поликристалла.

Как правило, наличие включений приводит к понижению температуры фазовых переходов, графитизации, снижая температурную устойчивость СТМ и изменяя прочностные характеристики в нежелательную сторону. При определенных условиях возможна реализация противоположного действия примесей в СТМ.

Так, в киборите наряду с некоторым увеличением твердости в интервале 800 – 100°K, объясняющимся выделением небольшого количества BNr на дефектных участках, аналогично гексанииту-Р проявляется еще один механизм упрочнения – взаимодействие легкоплавких примесей с поликристаллическим нитридом бора, в результате чего образуются тугоплавкие нитриды и бориды.

Если реакции идут с увеличением объема, то возникают напряжения сжатия, приводящие к упрочнению и росту твердости [25].

На роли включений в сверхтвердых поликристаллах на основе алмаза необходимо остановиться подробнее, поскольку именно включения оказывают решающее влияние на структурные изменения при термическом, механическом воздействии, приводящие к существенной потере прочности. Металлофаза при нагреве и абразивном воздействии вызывает снижение температуры начала обратного полиморфного превращения (графитизации), то есть – снижение термостойкости СПА, поскольку и Fe, и Ni, используемые при синтезе алмазов в

**Примечание [V85]:** Стр: 29  
[a№3019] Бочко А.В., Лавренко В.А.,  
Примачук В.Л., Проценко Т.Г. Окисле-  
ние поликристаллов гексаниита-Р различ-  
ного фазового состава // Сверхтвердые  
материалы. - 1986. - № 1. - С. 16-18.  
{Book: Date 31/08/02 Time 19:29:59}

**Примечание [V86]:** Стр: 29  
[a№3010] Невструев Г.Ф., Маль В.И.,  
Ильницкая Г.Д., Лысаковский В.С. Вли-  
яние дефектности поверхности синтети-  
ческих алмазов на их динамическую  
прочность // Сверхтвердые материалы. -  
1989. - № 1. С. 19-21. {Book: Date  
31/08/02 Time 19:30:39}

качестве растворителей, являются также активными катализаторами перехода алмаза в графит, снижая температуру от 1700 – 1800 до 1000°K.

Л. С. Палатник, Л. И. Гладких с сотрудниками установили, что отрицательная роль включений в СТМ на основе алмаза этим не ограничивается. Не менее важная сторона их влияния заключается в том, что примеси являются источником термических напряжений, инициирующих разрушение до начала графитизации [136].

Как известно, в структуре СТМ присутствуют два вида включений [136]: ориентированные, закономерно сопряженные с решеткой алмаза и заключенные внутри отдельных его кристаллитов, и неориентированные, расположенные по границам между ними. Механизмы образования включений различны: ориентированные возникают в результате диффузионного распада пересыщенного твердого раствора металла в алмазе с эндотаксиальным выделением избыточного металла из решетки алмаза, неориентированные включения формируются путем кристаллизации жидкого расплава-раствора углерода в металле при снятии температуры после синтеза

При нагреве СТМ на основе алмаза уже до  $T \sim 1070^\circ\text{K}$  происходит окисление металлических включений, в первую очередь неориентированных, в результате чего разрыхляются границы между отдельными кристаллитами алмаза и формируются внутренние напряжения, связанные с различием удельных объемов.

Ориентированные включения инициируют удаление и разрушение алмазных зерен вследствие возникающих межфазных напряжений. Именно ориентированные включения облегчают и процесс графитизации алмаза, поскольку внутреннее разрушение алмазных кристаллитов сопровождается образованием новых поверхностей раздела, где и начинается графитизация.

Таким образом, превращения во включениях в СТМ на основе алмаза способствуют потере прочности и разрушению при сравнительно невысоких температурах до начала полиморфных обратных превращений. При повышении температуры отжига (до  $T \sim 1270^\circ\text{K}$ ) возможны процессы миграции металлофазы по направлению к межблочным границам или границам кристаллитов, а также выделение включений ( $T = 1470^\circ\text{K}$ ) на внешнюю поверхность кристалла в виде капель размером 50 – 500 мкм [112]. Наряду с полиморфными превращениями и изменением фазово-структурного состояния примесей термическое воздействие может вызвать в СТМ окислительные процессы, параметры кото-

**Примечание [V87]:** Стр: 30

[a№3112] Палатник Л.С., Гладких Л.И. О механизме структурных превращений в системе углерод-металл // ДАН СССР. - 1971. - Т. 200. - № 1. - С. 81-84. {Book: Date 18/08/02 Time 17:24:30}

**Примечание [V88]:** Стр: 30

[a№3112] Палатник Л.С., Гладких Л.И. О механизме структурных превращений в системе углерод-металл // ДАН СССР. - 1971. - Т. 200. - № 1. - С. 81-84. {Book: Date 18/08/02 Time 17:24:30}

**Примечание [V89]:** Стр: 30

[a№3007] Тхагапсоев Х.Г., Хапачев Б.С., Гукьямухов П.М., Гоов А.А., Хажуев В.Ш. Механизм износа алмаза в правящих инструментах // Алмазы и сверхтвердые материалы. М.: НИИМАШ, 1979, Вып. 1. С. 9-11. {Book: Date 31/08/02 Time 19:31:27}

рых (температура начала окисления, скорость, время или температура полного окисления), аналогично графитизации, определяются индивидуальными особенностями материала, а также условиями проведения эксперимента. В связи с этим в литературе указываются, как правило, широкие интервалы температур окисления СТМ, либо называется конкретный материал. Уровень температуры, при котором становится заметным окисление алмазов на воздухе, составляет 800 – 1000°K [170]. Устойчивость алмазов к окислению, как указывалось выше, резко снижается примесями. Диапазон температур начала окисления для различных поликристаллов на основе нитрида бора еще более широк – 900 – 1600°K [90, 194], скорость окисления становится существенной при  $T = 1100 - 1200^\circ\text{K}$ . В результате указанных процессов наблюдается снижение твердости, прежде всего, на поверхности. Так, в работе [66] исследовалось распределение толщины слоя пониженной твердости от температуры отжига, изменяющейся от 5 - 10 мкм при 1200°K до 50 – 60 мкм при 1400°K и разупрочнения материала по всему объему. При общей тенденции снижения механических свойств за счет окислительных процессов авторами отдельных публикаций отмечается и возможность положительной роли мало интенсивного окисления в поликристаллах на основе нитрида бора при определенных условиях [139]. В качестве примера приводятся результаты термообработки композита 05-ИТ и эльбора-Р при  $T \leq 1073^\circ\text{K}$ , повышающей их прочность, что обусловлено окислением КНБ с образованием  $\text{B}_2\text{O}_3$ , пленка которой покрывает зерна, залечивая микродефекты и оказывая цементирующее действие. Содержание  $\text{B}_2\text{O}_3$ , возникающее в результате окисления, невелико ( $\sim 1 - 2\%$ ), но с учетом коэффициента увеличения объема при образовании  $\text{B}_2\text{O}_3$  равного 2.65, количества оксида бора достаточно для существенного упрочнения поверхности зерен.

Помимо описанных структурных превращений одним из следствий термообработки СТМ является изменение макро- и микронапряженного состояния в поликристаллических спеках, представляющих собой многофазный материал, из-за различия модуля Юнга, модулей объемного сжатия, коэффициентов термического расширения, анизотропии упругих свойств решеток, разницы в удельных объемах фаз, текстуры и других факторов [117, 139, 179]. Учет напряжений, обусловленных тепловым воздействием, достаточно сложен [14], поскольку уже в исходном состоянии, то есть после синтеза, структуры СТМ напряжены (табл. 1.1).

**Примечание [V90]:** Стр: 31

[a№1092] Синтетические сверхтвердые материалы: В 3 т. / Редкол: Н.В. Новиков... - Киев: Наук. думка, 1986. - Т. 3: Применение ССМ. - 278 с. {Book: Date 31/08/02 Time 19:32:15}

**Примечание [V91]:** Стр: 31

[a№3066] Кулакова И.И., Руденко А.П. Скорости каталитического окисления различных граней алмаза // Журн. физ. хим. - 1974. - Т. XLV111. Вып. 4. - С. 880-883. {Book: Date 02/09/02 Time 16:59:26}

**Примечание [V92]:** Стр: 31

[a№3021] Федосеев Д.В., Успенская К.С. Окисление алмаза (Обзор) // Синтетические алмазы. - 1976. Вып. 4. - С. 18-24. {Book: Date 02/09/02 Time 17:00:14}

**Примечание [V93]:** Стр: 31

[a№819] Износостойкость алмазных зерен при микрорезании титанового сплава ВТ8 / Н.И. Богомолов, Н.В. Есаулов, Г.И. Саотин, В.Г. Сасков // Сверхтвердые материалы. - 1980. - № 4 с. 43-44. {Book: Date 31/08/02 Time 19:33:04}

**Примечание [V94]:** Стр: 31

[a№652] Поляков В.П., Ножкина А.В., Чириков Н.В. Алмазы и сверхтвердые материалы: Учеб. пособие. - М.: Металлургия, 1990. - 326 с. {Book: Date 31/08/02 Time 19:33:42}

**Примечание [V95]:** Стр: 31

[a№3059] Новиков Н.В., Воронин Г.А. Расчет напряженно-деформированного состояния кристаллов синтетических алмазов методом конечных элементов // Сверхтвердые материалы. - 1983. - № 1. - С. 13-16. {Book: Date 03/09/02 Time 13:52:05}

**Примечание [V96]:** Стр: 31

[a№652] Поляков В.П., Ножкина А.В., Чириков Н.В. Алмазы и сверхтвердые материалы: Учеб. пособие. - М.: Металлургия, 1990. - 326 с. {Book: Date 31/08/02 Time 19:34:23}

**Примечание [V97]:** Стр: 31

[a№322] Технологические остаточные напряжения / А.В. Подзей, А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев, Г.З. Серебrenников. - М.: Машиностроение, 1973. - 216 с. {Book: Date 02/09/02 Time 17:02:49}

**Примечание [V98]:** Стр: 31

[a№773] Биргер И.А. Остаточные напряжения. - М.: Машгиз, 1963. - 232 с. {Book: Date 02/09/02 Time 17:04:32}

Таблица 1.1 – Макро- и микронапряжения в СТМ после синтеза [160, 168]

Тип СТМ	Напряжения $\sigma$ , ГПа
АСБ	2 – 4
АСПК	1.15 – 2.75
АКМ	1.2 – 3.5
Эльбор-Р	3 – 5.3
Однофазные поликристаллы $BN_B$ ( $BN_{cf}$ )	0.2
Двухфазные поликристаллы на основе нитрида бора ( $BN_B + BN_{cf}$ )	0.2–2
Двухслойный композиционный материал на основе $BN_{cf}$	до 4

**Примечание [V99]:** Стр: 32  
[a№3323] Верещагин Л.Ф., Яковлев Е.Н., Варфоломеева Т.Д. др. Синтез алмазов типа карбонадо // Докл. АН СССР. - Том 185. - № 3. - 1969. - С. 555-556. {Book: Date 02/09/02 Time 17:10:38}

**Примечание [V100]:** Стр: 32  
[a№645] Синтетические сверхтвердые материалы: В 3 т. / Редкол: Н.В. Новиков... - Киев: Наук. думка, 1986. - Т.1: Синтез CCM. - 278 с. {Book: Date 02/09/02 Time 17:09:14}

Величина микродеформации при отжиге определяется, с одной стороны, эффективностью процессов релаксации (микрорастрескивания), а с другой – увеличением микронапряжений в результате фазовых изменений. Поскольку релаксационные процессы облегчены в приповерхностных слоях и затруднены в объеме, возможно создание неоднородного распределения межфазных напряжений по глубине.

Роль макро- и микронапряжений чрезвычайно велика, поскольку при наложении внешних нагрузок (тепловых, силовых), особенно носящих циклический характер, внутренние напряжения, приводя к микрорастрескиванию, отвечают за изменение механических свойств.

Так, в двухфазных образцах на основе нитрида бора обнаружены существенные макро- и микронапряжения (до 2 ГПа), обусловленные макроскопически неоднородным распределением фаз по объему и неоднородными упругими деформациями кристаллитов. Их термообработка термоциклированием приводит к релаксации макронапряжений в объеме и микронапряжений в поверхностных слоях из-за образования графитоподобного нитрида бора с большим объемом, чем исходные фазы [156].

Этим изменениям напряженного состояния соответствует изменение микротвердости (снижение – при больших нагрузках и резкое увеличение – при низких).

Анализ литературы показал, что тепловое воздействие обуславливает существенные изменения структурно-фазового состояния и прочностных свойств СТМ на основе алмаза и нитрида бора, что, несомненно, помогает раскрыть суть процессов обработки и эксплуатации сверхтвердых поликристаллов, сопровождающихся высокоинтенсивными тепловыми явлениями. Однако, необ-

**Примечание [V101]:** Стр: 32  
[a№422] Русанов В.В. Исследование физических явлений и качества поверхности при алмазном шлифовании композиции «синтетические сверхтвердые материалы - сталь»: Автореф. дис... канд. техн. наук. - Киев, 1980. - 23 с. {Book: Date 31/08/02 Time 19:35:36}

ходимо учитывать, что в данных вопросах весьма важен и другой фактор – силовой. Совместное же действие тепла и силового нагружения, а также циклический характер их приложения могут инициировать специфические структурно-прочностные изменения в сверхтвердых поликристаллах. Внутренние напряжения, приводя к микрорастрескиванию, отвечают за изменение механических свойств. Цикличность же термодинамического воздействия (скорость нагрева, например, при шлифовании может достигать нескольких тысяч градусов в секунду [30]) ведет к возникновению усталостных явлений и созданию сложного напряженного состояния в многофазных поликристаллах СТМ [119].

Несмотря на актуальность и важность вопросов, касающихся структурно-фазовых превращений, напряжений, а также прочностных изменений в СТМ в процессе их обработки и эксплуатации в качестве лезвийного инструмента, работы, посвященные этим проблемам, носят единичный характер [12, 58, 107, 125, 181].

Наряду со структурными изменениями, происходящими в сверхтвердых материалах в процессе теплосилового нагружения, не менее важен также учет и субструктурных превращений, что обусловлено их связью с процессами упрочнения и определяющей ролью в эксплуатационных свойствах.

### 1.5. Анализ процесса шлифования с позиций микроразрушения взаимодействующих поверхностей

При производительном алмазном шлифовании СТМ отделение объемов материала, составляющего припуск под обработку, от собственно детали происходит преимущественно хрупкого микроразрушения как СТМ, так и алмазных зерен [34, 65, 75, 76, 135, 165, 168]. Поэтому поверхности первичного разделения формируются при довлеющем механизме хрупкого разрушения в процессе зарождения, развития и вскрытия трещин. Особенности движения последних в ковалентных кристаллах, в том числе в алмазе, посвящен ряд работ [122, 132, 161, 195, 211]. При ударном нагружении появление трещины в алмазе вызывается прямой или отраженной продольной упругой волной. Начальная скорость зависит от силы удара и температуры испытания. При повышенных температурах она меньше. Среднее значение равно 2800 м/с, рассчитанное значение скорости по константам упругости поперечных упругих волн 12040 м/с, т. е. отношение скорости раскола к скорости поперечных упругих волн составляет 0.6 [83]. По мнению В. М. Финкеля [196], в первые моменты разрушения

**Примечание [V102]:** Стр: 33  
[a№3011] Артюхов В.П., Боримский А.И., Никитин Ю.И., Уман С.М., Бирман З.М., Ковтушенко В.С., Манжар В.А. Высокопрочные шлифпорошки из синтетических алмазов марок AC50, AC65, AC80 // Сверхтвердые материалы. - 1988. - № 2. - С. 29-31. {Book: Date 31/08/02 ...}

**Примечание [V103]:** Стр: 33  
[a№3013] Новиков Н.В., Дуб С.Н., ...

**Примечание [V104]:** Стр: 33  
[a№596] Беззубенко Н.К., Евдокимов ...

**Примечание [V105]:** Стр: 33  
[a№582] Беззубенко Н.К., Евдокимов ...

**Примечание [V106]:** Стр: 33  
[a№3065] Дятлов Ю.А. Напряжения в ...

**Примечание [V107]:** Стр: 33  
[a№3053] Механика разрушения и пр ...

**Примечание [V108]:** Стр: 33  
[a№3248] Новиков Н.В., Девин Л.Н. ...

**Примечание [V109]:** Стр: 33  
[a№16] Грабченко А.И. Хрупкое макр ...

**Примечание [V110]:** Стр: 33  
[a№3156] Иванова В.С. Усталость и ...

**Примечание [V111]:** Стр: 33  
[a№3309] Калафатова Л.П. Энергетич ...

**Примечание [V112]:** Стр: 33  
[a№3298] Калафатова Л.П., Богатырев ...

**Примечание [V113]:** Стр: 33  
[a№3268] Оценка прочности хрупких ...

**Примечание [V114]:** Стр: 33  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., ...

**Примечание [V115]:** Стр: 33  
[a№645] Синтетические сверхтверды ...

**Примечание [V116]:** Стр: 33  
[a№3057] Новиков Н.В., Майстренко ...

**Примечание [V117]:** Стр: 33  
[a№740] Новиков Н.В. и др. Определ ...

**Примечание [V118]:** Стр: 33  
[a№662] Семенов А.П., Поздняков В.И. ...

**Примечание [V119]:** Стр: 33  
[a№3046] Семко М.Ф., Красильников ...

**Примечание [V120]:** Стр: 33  
[a№3067] Физические свойства алмаз ...

**Примечание [V121]:** Стр: 33  
[a№3239] Кольский Г., Рейдер Д. Вон ...

**Примечание [V122]:** Стр: 33  
[a№3316] Финкель В. М. Физические ...



вскрытие трещины в моно- и поликристаллах незначительное. Силы связи между стенками микротрещин, предшествующих макротрещине, возрастают вследствие монотонного убывания расстояния между ними до межатомного. Это вытекает из положения П. А. Ребиндера [150, 151] о клиновидной трещине с устьем, сходящим до межатомного расстояния. Отсюда же следует принципиальная возможность исчезновения трещины при определенных условиях, ее захлопывания и восстановления сплошности материала. В наших опытах по резанию единичным зерном СТМ на основе алмаза неоднократно наблюдалась полная релаксация следа алмазного зерна (царапины).

При развитии микротрещин возможно их ветвление. Последнее обусловлено встречей фронта трещины и отраженных от границ тела упругих импульсов, внутренними напряжениями и нестабильностью трещин, наступающей при достижении критических скоростей. Нестабильность магистральной трещины вызывает ее искривление, возникает элементарный акт ветвления. Оно бывает при статическом и динамическом нагружении, однако, в последнем случае могут появиться две магистральные трещины. Усложнению образующегося рельефа способствуют поверхностные волны, распространяющиеся по полостям трещины [83]. Обладая малой кинетической энергией, они распространяются лишь по одной плоскости спайности. С увеличением запаса кинетической энергии (ростом скорости) возрастает интенсивность излучения поверхностных волн на фронте трещины, которая получает способность перескакивать с одной плоскости спайности на другую. Для алмаза, по-видимому, картина упрощается, поскольку сопутствующая пластическая деформация чрезвычайно мала, к тому же структура поликристаллов имеет значительные искажения. Развиваясь от кристаллита к кристаллиту, трещины меняют направление в силу анизотропии их упругих свойств.

Изложенные представления объясняют тот факт, что по морфологии поверхность первичного раздела объемов поликристаллов СТМ сложна и в общем случае близка к поверхности, образованной при хрупком изломе поликристалла в условиях шлифования, предотвращающих приспособляемость кругов, но в общем случае поверхность раздела подвергается дальнейшему воздействию перемещающихся алмазных зерен круга, его связи, осколков алмазных кристаллитов, изнашиваемых зерен. При этом тонкие приповерхностные объемы поликристалла разогреваются, возможны графитизация и окислительное влияние среды. Естественно, что на этапе проявления структурно-топографической приспособляемости взаимодействующих поверхностей микрообъемы хрупко

**Примечание [V123]:** Стр: 34  
[a№3154] Ребиндер П.А. Значение физико-химических процессов при механическом разрушении и обработке твердых тел в технике // Вестник АН СССР, 1940. Вып. 8, 9. {Book: Date 02/09/02 Time 17:35:54}

**Примечание [V124]:** Стр: 34  
[a№3279] Ребиндер П.А. Физико-химическая механика. - М.: Наука, 1979. - 124 с. {Book: Date 02/09/02 Time 17:35:13}

**Примечание [V125]:** Стр: 34  
[a№3239] Кольский Г., Рейдер Д. Воны напряжений и разрушение. - в кн.: Разрушение. М., 1973, т.1, с.570-608. {Book: Date 01/09/02 Time 00:26:51}

удаляемого материала уменьшаются, преобладает влияние процессов трения. Высокая интенсивность протекания последних обусловлена равной твердостью контактирующих тел, а также высокими модулями упругости. В этот момент усиливается и пластическая деформация в тончайших приповерхностных слоях. Подтверждением этому служат результаты определения плотности дислокации в приповерхностных слоях в результате разрушения изломом и после шлифования (разрезки) [64, 174].

В реальном процессе шлифования рельеф поверхности первичного раздела претерпевает указанные изменения не по всей площади. Значит, обработанная поверхность СТМ содержит участки, сформированные при первичном разделе, и те, которые подвергались вторичным изменениям. Все это и является причиной крайне неоднородного характера окончательного рельефа [220, 225, 231, 244, 245]. Такая поверхность имеет четко выраженные: границу зон с отличающимся субмикрорельефом, где отражены различные механизмы микро-разрушения материала при шлифовании, зоны хрупкого разрушения и с признаками пластической деформации, микрополости и т.д. Исследование поверхности синтетических поликристаллов алмаза и нитридов бора после шлифования позволило установить общие особенности формирования и состояния поверхности, характерные для всех изучаемых типов СТМ, и частные, обусловленные индивидуальностью структуры и физико-механических свойств поликристаллов каждой группы [224, 227, 236, 240]. При оптических исследованиях наблюдалось общее внешнее сходство обработанных поверхностей СТМ и твердых сплавов, минералокерамики: организованные следы, т. е. риски микрокромов алмазных зерен кругов и многочисленные бесформенные (при малых увеличениях) вырывы, сколы и поры в виде темных пятен. Это сходство больше выражено у поликристаллов второй группы, в меньшей степени – первой группы.

Следы воздействия алмазных зерен круга представляют собой отдельные борозды с неровными краями и неодинаковые по частоте повторяемости на поверхности, глубине, ширине и протяженности, интенсивности изменения. В основе изменения следов лежит интенсивное разрушение алмазных зерен круга при обработке АСБ, АСПК, диамета.

Особенность обработанной поверхности алмазов – наличие большого количества крупных (десятая микрометров) дефектов. Последние могут быть бесформенными и в виде ярко выраженных треугольников (углубления, образовавшиеся в результате выбивания отдельных микрочастиц, микроблоков).

**Примечание [V126]:** Стр: 35  
[a№31110] Зубков В.М., Семенова-Тян-Шанская А.С., Епишина Н.И. Микро-твердость и плотность дислокации кристаллов алмаза // Алмазы. - 1969. Вып. 1. - С. 5-7. {Book: Date 02/09/02 Time 17:39:13}

**Примечание [V127]:** Стр: 35  
[a№3308] Старков В.К. Дислокационные представления о резании металлов. - М.: Машиностроение, 1979. - 160 с. {Book: Date 02/09/02 Time 17:38:59}

**Примечание [V128]:** Стр: 35  
[a№172] Kakino Y., Matsuyama A., Yamaji I., Matyda K., Nakagawa H., Hirogaki N., Kita Y. // In-situ Measurement of Grinding Wheel Surface Topography Int. J. Japan Soc. Prec. Eng. - Vol.31, № 4 (Dec.1997), I - P. 273-277. {Book: Date 02/09/02 Time 17:48:48}

**Примечание [V129]:** Стр: 35  
[a№466] Matsuo, T., Touge, M., Yamada, H., 1997, High-Precision Surface Grinding of Ceramics with Superfine Grain Diamond Cup Wheels, Annals of CIRP, 46/1: 249-252. {Book: Date 02/09/02 Time 17:47:40}

**Примечание [V130]:** Стр: 35  
[a№3054] Rooke D.P., Jones D.A. Stress intensity factors in fretting fatigue // J. Strain Anal. - 1979. - 14. - № 1. - P. 1-6. {Book: Date 02/09/02 Time 17:45:26}

**Примечание [V131]:** Стр: 35  
[a№487] Xie, Y., Bhushan, B., 1996, Effects of Particle Size, Polishing Pad and Contact Pressure in Free Abrasive Polishing, Wear, 200: 281-295. {Book: Date ...}

**Примечание [V132]:** Стр: 35  
[a№464] Lonardo, P.M., Trumpold, H., Yamada, R., 1992, Surface Topography Assessment of High-Precision Coated Abrasive Tape and Estimation of Its Machining Perfor- ...

**Примечание [V133]:** Стр: 35  
[a№464] Lonardo, P.M., Trumpold, H., De Chiffre, L., 1996, Progress in 3D Surface Microtopography Characterization, Annals of CIRP, 45/2: 589-598. {Book: Date ...}

**Примечание [V134]:** Стр: 35  
[a№468] Nakao, M., Hatamura, Y., 1996, Development of an Intelligent Face Grinding Machine to Fabricate Ultraflat Surfaces on Thin, Brittle Substrates, Annals of CI ...

**Примечание [V135]:** Стр: 35  
[a№475] Semba, T., Tani, Y., Sato, H., 1996, Development of Melamine-Bonded Diamond Wheels with High Porosity for Smooth and Mirror Finishing of Die Ma ...

**Примечание [V136]:** Стр: 35  
[a№480] Tomita, Y., Eda, H., 1996, A Study of the Ultra Precision Grinding Process on a Magnetic Disk Substrate-Development of New Bonding Materials ...

Треугольники – это след выбивания блоков, имевших форму октаэдра. Большое количество дефектов такой формы свидетельствует, что в микрообъеме разрушение поверхности АСБ и АСПК происходит по кристаллографическим плоскостным сеткам октаэдра [47, 66, 172, 176, 214]. Следует лишь добавить, что дефекты обработанной поверхности являются в большой мере наследственными и определяются особенностями структуры СТМ.

Электронно-микроскопическое исследование шлифованной поверхности АСБ и АСПК подтверждает, что формирование поверхности раздела происходит преимущественно в результате хрупкого разрушения. При этом разрушение кристаллита синтетического алмаза аналогично разрушению природного, т. е. оно происходит или начинает происходить преимущественно по кристаллографическим плоскостям [193]. Об этом свидетельствуют характерные для этой плоскости направления следов сколов.

Однако при недостаточной развитости рельефа рабочей поверхности значительная часть обработанной поверхности АСБ и АСПК формируется в результате вторичного воздействия уплощенных зерен круга, т.е. в условиях преобладающего трения после образования поверхности первичного раздела. На этих участках структура поликристалла не просматривается. Электронные микрофотографии позволяют сделать вывод о формировании вторичной структуры в результате пластической деформации в тончайшем слое, что свидетельствует о наличии в зоне контакта высоких локальных температур, приводящих к снижению микротвердости тончайшего слоя обрабатываемого алмаза. Пластическая деформация носит локальный характер, чередуясь со сколами [165]. Анализ большого количества образцов поликристаллических алмазов с обработанной поверхностью подтвердил наличие отдельных участков, где следы обработки выражены слабо либо вообще не выражены. Они составляют значительную часть обработанной площади. Учитывая поликристаллическое строение АСБ и АСПК, отмеченные участки можно трактовать как зерна поликристалла или их скопления, ориентированные таким образом, что их наиболее трудно обрабатываемая плоскость параллельна поверхности шлифования либо близка к этому. Первое подтверждается практически отсутствием вырывов, имеющих форму треугольника, второе тем, что треугольники, если они встречаются, не равнобедренные, а равнобедренные.

Вместе с тем появление площадок на кристаллитах алмазов можно рассматривать как свидетельство процессов окисления и графитизации, вызванных высокой локальной температурой при трении алмаза по алмазу. Об этом же

**Примечание [V137]:** Стр: 36  
[a№3128] Девин Л.Н., Вильгельм М. Прогнозирование вероятности разрушения резцов из поликристаллов на основе КНБ // Сверхтвердые материалы. - 1992. - № 6. - С. 41-46. {Book: Date 18/08/02 Time 16:35:01}

**Примечание [V138]:** Стр: 36  
[a№819] Износостойкость алмазных зерен при микрорезании титанового сплава BT8 / Н.И. Богомолов, Н.В. Есаулов, Г.И. Саотин, В.Г. Сасков // Сверхтвердые материалы. - 1980. - № 4 с. 43-44. {Book: Date 02/09/02 Time 18:07:55}

**Примечание [V139]:** Стр: 36  
[a№590] Скрыбин В.А., Лемин В.А. Моделирование процесса субмикрорезания при обработке деталей закрепленным абразивом // Изв. вузов. Машиностр. - 1989. - № 12. - с. 118-122. {Book: Date 02/09/02 Time 18:07:24}

**Примечание [V140]:** Стр: 36  
[a№581] Таратылов О.В. Особенности микрорезания при суперфинишировании // Технол. и пр-во деталей автомоб. техн. - М, 1990. - с. 50-59. {Book: Date 02/09/02 Time 18:07:02}

**Примечание [V141]:** Стр: 36  
[a№459] DeChiffre, L., Hansen, H.N., Bronstein, A., 1996, Investigation on the Surface Topography in Polishing Using Atomic Force Microscopy, Annals of CIRP, 45/1: 523-528. {Book: Date 02/09/02 Time 18:06:11}

**Примечание [V142]:** Стр: 36  
[a№3194] Федорович В.А., Пупань Л.И. Электронно-микроскопическое исследование поверхности алмазных зерен шлифовального круга после обработки АСБ // Резание и инструмент. - Харьков: Вища школа. - 1981. Вып. 20. - С. 23-27. {Book: Date 01/09/02 Time 00:28:57}

**Примечание [V143]:** Стр: 36  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоровский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 18/08/02 Time 16:36:34}



свидетельствует и наличие пустот между металлом-катализатором и алмазной матрицей [168].

Общим для всех алмазных поликристаллов при активированном состоянии рабочего рельефа круга является преобладание участков поверхности, сформированных в результате хрупкого микроразрушения СТМ, о чем свидетельствуют количественная оценка удельных значений длины микрополостей и площади участков хрупкого разрушения в различные периоды работы круга, которая для ДАП, например, в 3 раза больше, чем при шлифовании ДПНБ. Продолжительность шлифования и связанное с ней изменение режущего рельефа алмазного круга существенно влияет на характер субмикрорельефа поверхности СТП, вызывают изменения численных значений его параметров.

Удельная площадь участков поверхности первичного раздела как проявление механизма хрупкого разрушения максимальна в начальный период шлифования, когда режущий рельеф круга и субмикрорельеф его алмазных зерен хорошо развиты. По мере усиления приспособляемости и сглаживания режущего рельефа доля этих участков падает, а через 10 – 15 мин уменьшается в два–три раза. Возрастание участков поверхности с признаками пластической деформации, а также их преобладание в завершающий период шлифования количественно подтверждают исключительно большую роль процессов трения при алмазном шлифовании СТМ [4, 31, 228].

Таким образом, количественная оценка параметров субмикрорельефа обработанной поверхности подтверждает влияние интенсификации шлифования на реализацию механизмов хрупкого разрушения СТМ под влиянием режущих зерен алмазного круга. Эта закономерность проявляет себя неизменно при варьировании такими условиями обработки, как нормальное давление, скорость круга, зернистость и т. д. Количественный анализ субмикрорельефа по удельной площади участков хрупкого разрушения и суммарной длине микрополостей на единице обработанной поверхности доказал прямую их связь с режимом шлифования и характеристиками кругов, степенью активации рабочей поверхности кругов, т. е. условиями разрушающего воздействия на поликристалл в процессе обработки.

Поверхность СТМ на основе нитрида бора имеет более четкие следы обработки [165]. Их характер, поперечный и продольный микропрофиль позволяют утверждать, что формирование поверхности этих материалов также происходит в результате хрупкого разрушения путем растрескивания и скалывания микроблоков. Однако, размеры скалываемых частиц значительно меньше, чем у

**Примечание [V144]:** Стр: 37  
[a№645] Синтетические сверхтвердые материалы: В 3 т. / Редкол: Н.В. Новиков... - Киев: Наук. думка, 1986. - Т.1: Синтез ССМ. - 278 с. {Book: Date 01/09/02 Time 00:23:21}

**Примечание [V145]:** Стр: 37  
[a№24] Зайцев А.Г., Старов В.Н., Скрипченко В.Г., Фоменко В.П. Алмазное шлифование хрупких материалов кругами с ориентированным расположением зерен // Межвуз. сб. науч. тр. Пенз. политехн. ин-та. Вып. 11. - Пенза: - 1982. С. 33-35. {Book: Date 02/09/02 Time 18:17:15}

**Примечание [V146]:** Стр: 37  
[a№790] Голубев И.В. Круглое наружное шлифование со стабилизацией режущей способности токопроводящего инструмента электрическими разрядами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - М.: 1985. - 16 с. {Book: Date 02/09/02 Time 18:16:25}

**Примечание [V147]:** Стр: 37  
[a№470] Ohmori, H., Nakagawa, T., 1990, Mirror Surface Grinding of Silicon Wafers with Electrolytic In-process Dressing, Annals of CIRP, 39/1: 329-332. {Book: Date 02/09/02 Time 18:15:41}

**Примечание [V148]:** Стр: 37  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 01/09/02 Time 00:22:34}

алмазов. Наблюдаемые на шлифованной поверхности дефекты бесформенные, а их количество и размеры меньше, чем на обработанной поверхности поликристаллических алмазов [23, 74, 77, 221].

Различия между эльбором-Р, ПТНБ и гексанитом-Р более существенны, чем между СКМ, АСБ, АСПК. Поликристаллы на основе нитрида бора имеют более низкую теплопроводность и меньшую исходную твердость, чем алмазы. Поэтому при их алмазном шлифовании реализуется превышение твердости инструмента над твердостью обрабатываемого материала и процесс приближается к процессу шлифования керамики [19, 69, 213, 237, 238, 243].

Высокая, по сравнению с алмазами, интенсивность шлифования поликристаллов на основе нитрида бора обусловлена большей глубиной внедрения зерен круга в обрабатываемый материал. Это, в свою очередь, вызывает рост сил резания из-за увеличения площади единичного среза и большой абсолютный износ круга в результате истирания связки об обрабатываемую поверхность. В отличие от алмазов на обработанной поверхности нитрида бора наблюдаются сплошные гладкие полосы, ширина и протяженность которых соизмеримы с аналогичными параметрами борозд от единичных зерен. Однако это не противоречит утверждению о преимущественно хрупком первичном разрушении данных материалов. Более высокая чистота обработки поликристаллов нитрида бора обусловлена меньшими размерами скалываемых блоков, что, в свою очередь, объясняется более высокой степенью диспергирования. Высокая твердость алмаза исключает возможность ощутимого внедрения зерен круга, съем припуска осуществляется путем скалывания более крупных частиц и, как следствие этого, обработанная поверхность должна иметь большую шероховатость.

Шероховатость обрабатываемой поверхности непосредственно зависит от того, какие механизмы разрушения СТМ реализуются в тех или иных условиях шлифования. Следовательно, состояние рабочей поверхности круга является определяющим для получаемой шероховатости обработанной поверхности. Если не предотвращать структурно-топографическую приспособляемость режущей поверхности, то шероховатость обработанной поверхности по критерию  $Ra$  в первый период меняется в пределах 0.5 – 0.3 мкм, а после 30 мин шлифования в пределах 0.3 – 0.15 мкм соответственно. Наибольшему значению нормального давления соответствовала наименьшая шероховатость. Когда усилие прижима детали к кругу большое, он быстрее прирабатывается, но одновременно снижается вероятность отрыва шлифуемого образца от его режущей поверхности, что ослабляет ударные нагрузки на поликристалл. Эти две причины

**Примечание [V149]:** Стр: 38  
[a№3297] Витвицкий П.М., Попина С.Ю. Прочность и критерии хрупкого разрушения стохастически дефектных тел. - К.: Наук. думка, 1980. - 186 с. {Book: Date 02/09/02 Time 18:18:47}

**Примечание [V150]:** Стр: 38  
[a№3295] Калафатова Л.П. Диагностика дефектности обработанной поверхности технических спаллов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. - Донецк: ДонГУ. - 1997. - Вып. 4. - С.66-75. {Book: Date 02/09/02 Time 18:19:06}

**Примечание [V151]:** Стр: 38  
[a№3180] Калинин В.Д. Влияние скульптуры граней и дефектности низкосортных алмазов на их механические свойства // Алмазы. - 1972. Вып. 1. - С. 1-3. {Book: Date 02/09/02 Time 18:18:25}

**Примечание [V152]:** Стр: 38  
[a№3121] Kao R., Perrone N. Large deflection solution of the coaxialring-circular-glass-plate flexure problem // J. Amer. Ceram. Soc. - 1971. - 5. - № 11. - P. 566-571. {Book: Date 02/09/02 Time 18:21:00}

**Примечание [V153]:** Стр: 38  
[a№3195] Бурмистров В.В. Научные основы надежности технологических систем алмазно-абразивной обработки технической керамики и спаллов. - Самара: Диамант-Феникс, 2001. - 122 с. {Book: Date 02/09/02 Time 18:24:45}

**Примечание [V154]:** Стр: 38  
[a№3060] Грабченко А.И., Пыжов И.Н., Магазев М.Г., Грибовски Л. Использование электроэрозии для обработки сверхтвердых материалов и режущей керамики // Резание и инструмент в те...

**Примечание [V155]:** Стр: 38  
[a№179] Bandyopadhyay B.P., Ohmori H., Takahashi I. Ductile Regime Mirror Finish Grinding of Ceramics with Electrolytic In-process Dressing (ELID) // Grinding, Materials and Manufacturing Processes. - 199...

**Примечание [V156]:** Стр: 38  
[a№476] Suzuki, K., Tochinai, H., Uematsu, T., Mishiro, S., 1993, A New Grinding Method for Ceramics Using a Biaxially Vibrated Nonrotational Ultrasonic Tool, Annals of CIRP, 42/1: 417-420. ...

**Примечание [V157]:** Стр: 38  
[a№3264] T. Warren Liao Flexural Strength Of Creep Feed Ground Ceramics: General Pattern, Ductile-Brittle Transition And MLP Modeling // Machine Tools & Manufacture. - 1998. - V. 38, № 4. - P. 2 ...

**Примечание [V158]:** Стр: 38  
[a№147] Wunder W. Machining stlatite, titanium dioxide compound and porous ceramic work-pieces with diamond tools // Ln: YDR. - 1975. № 11. - P. 402-405. {Book: Date 02/09/02 Time 18:23:22}

и определяют существо влияния нормального давления на формирование шероховатости обработанной поверхности и значение ее параметров. Поверхность сверхтвердых материалов на основе нитрида бора имеет меньшую шероховатость, чем у алмазов. Общая причина столь небольшого изменения шероховатости – постоянство механизмов разрушения, преобладающих для данного диапазона условий. Площадь участков первичной хрупкой повреждаемости практически изменяется мало. Условия обработки влияют на интенсивность, характер действия этих явлений и, следовательно, на показатели процесса (производительность  $Q$ , усилия  $P_z$ , температура  $T$ ), а не на механизм разрушения объемов СТМ, составляющих припуск под обработку [1, 13, 152, 207].

Управляя рабочей поверхностью круга с различной интенсивностью, можно изменять шероховатость всех обрабатываемых СТМ в пределах, определяемых структурой и свойствами поликристаллов. Снижению шероховатости способствует увеличение зернистости, скорости круга, концентрации алмазов. Рост нормального давления и тока цепи управления ухудшают шероховатость [165]. Эти тенденции справедливы для всех марок обрабатываемых материалов, однако абсолютные значения шероховатости безусловно связаны со структурой СТМ – для однородных мелкозернистых они ниже. Оптимизация процесса шлифования по критерию шероховатости будет изложена ниже. Здесь же рассмотрим изменения структуры материала поверхностного слоя СТМ, которые вместе с шероховатостью и тонким рельефом является важными составляющими обеспечения качества обработки сверхтвердых поликристаллов.

С учетом важности такой характеристики поверхностного слоя, как макро и микронапряжения, были выполнены соответствующие исследования. Данные расчета температурных полей [134], в частности, в плоскости XOZ использованы для оценки уровня термонапряжений в шлифуемых СТМ. Для этого применен метод конечных элементов.

Распределение термонапряжений, соответствующих максимальным градиентам температуры, свидетельствуют о том, что в алмазной фазе вблизи шлифуемой поверхности СТМ термонапряжения достигают предела прочности на сжатие алмазных монокристаллов. При выходе поликристалла из контакта с кругом и его охлаждении знак термонапряжений изменяется на противоположный [62, 109, 178]. Следовательно, локальное циклическое изменение термического режима порождает цикличность термонапряжений, что с учетом изменения их знака может стать причиной растрескивания поликристаллов. Эта вероятность усиливается тем, что СТМ – многофазные структуры с выраженной

**Примечание [V159]:** Стр: 39  
[a№758] Аврутин Ю.Д. Рельеф шлифовального круга и его связь с шероховатостью шлифованной поверхности: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Л, 1977. - 23 с. {Book: Date 02/09/02 Time 18:29:50}

**Примечание [V160]:** Стр: 39  
[a№771] Беззубенко Н.К., Кобзарь Л.Е. Шероховатость обработанной поверхности при внутреннем алмазно-искровом шлифовании // Резание и инструмент 1983. Вып. 30. с. 26-29. {Book: Date 02/09/02 Time 18:30:16}

**Примечание [V161]:** Стр: 39  
[a№903] Редько С.Г. Шероховатость поверхности при шлифовании металлов // Сборник научных сообщений (в помощь промышленности). Технология машиностроения. 1958. Вып. 13. с. 14-18. {Book: Date 02/09/02 Time 18:30:46}

**Примечание [V162]:** Стр: 39  
[a№3276] Шероховатость поверхностей монокристаллов корунда после механической обработки / И.П. Бабийчук, Е.Р. Добровинская, Л.А. Литвинов, А.П. Радченков // Там же. - 1988. - №3. - С. 57-58. {Book: Date 02/09/02 Time 18:28:54}

**Примечание [V163]:** Стр: 39  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 01/09/02 Time 00:30:00}

**Примечание [V164]:** Далее температурные напряжения можно убирать

**Примечание [V165]:** Стр: 39  
[a№421] Островерх Е.В. Тепловые явления и качество поверхностного слоя при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Киев, 1986. - 17 с. {Book: Date 17/08/02 Time 12:49:29}

**Примечание [V166]:** Стр: 39  
[a№620] Грабченко А.И., Мацевитый Ю.М., Лушпенко С.Д., Островерх Е.В. Зависимость коэффициента теплопроводности поликристаллических сверхтвердых материалов от температуры // ...

**Примечание [V167]:** Стр: 39  
[a№3160] Борисенко В.А., Григорьев О.Н., Мильман Ю.В. и др. Температурная зависимость микротвердости алмаза // Синтетические алмазы. - 1973. Вып. 5. - С. 12-13. {Book: Date 02/09/02 Time ...}

**Примечание [V168]:** Стр: 39  
[a№569] Мечник В.А. О температурном критерии для оценки режущей способности алмазного круга // Изв. вузов. Машиностроение. - 1990. - № 6. - с. 91-95. {Book: Date 02/09/02 Time 18:33:21}

анизотропией кристаллитов. Учитывая многофазность алмазных поликристаллов, различие коэффициентов теплового расширения металлических включений и алмазной матрицы, следует ожидать проявления межфазных микронапряжений. Новиков Н. В. [122] расчетным путем показал, что пороговая температура, при которой возможно объемное разрушение (растрескивание) композиционных СТМ, не превышает 676°K.

## 1.6. Анализ обрабатываемости и выбор базового метода обработки СТМ

Общая характеристика СТМ, приведенная в п. 1.2, дает достаточное основание для заключения о том, что все сверхтвердые материалы, несмотря на особенности и определенные отличия между собой, относятся к классу труднообрабатываемых прежде всего из-за высокой прочности межатомных связей в алмазных структурах, предельной твердости и жесткости, поликристаллического строения и др. [46, 93, 223].

Проблема обрабатываемости сверхтвердых материалов своими истоками уходит в глубокую древность, когда по крупницам накапливался опыт огранки природных алмазных кристаллов в бриллианты [60, 230]. Массовое производство синтетических поликристаллических алмазов и других сверхтвердых материалов потребовало отхода от традиционной технологии, базирующейся на процессе огранки с помощью чугунных дисков, шаржированных алмазным порошком [8]. Однако, создание научных основ обрабатываемости СТМ не возможно без учета накопленных знаний в области физики и технологии обработки природного алмаза.

Процесс формообразования при изготовлении изделий из природных алмазов весьма специфичен [60]. Задача состоит в разрушении одной части объема кристалла, которая составляет припуск под обработку, и одновременно обеспечении однородности и бездефектности другой части, которая должна составить собственно изделие (под бездефектностью в дальнейшем будем понимать непревышение их величины и количества допустимых значений).

Среди работ, посвященных исследованию механизма разрушения алмаза, выделяется группа, рассматривающая обработку непосредственно алмазов [81], и другая, где преобладают вопросы износа алмазного инструмента [133].

**Примечание [V169]:** Стр: 40  
[a№3057] Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н. Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов. - Киев: Наук. думка, 1993. - 220 с. {Book: Date 17/08/02 Time 12:51:10}

**Примечание [V170]:** Стр: 40  
[a№3005] Девин Л.Н. Определение предела прочности при растяжении поликристаллических сверхтвердых материалов // Сверхтвердые материалы. - 1988. - № 2. - С. 24-28. {Book: Date 02/09/02 Time 18:36:44}

**Примечание [V171]:** Стр: 40  
[a№3197] Лаптев В.А., Нефедов П.В., Дегучев Ю.А. Влияние прочности и термостойкости монокристаллов алмаза на работоспособность инструмента // Сверхтвердые материалы. - 1987. - № 6. - С. 45-46. {Book: Date 02/09/02 Time 18:37:14}

**Примечание [V172]:** Стр: 40  
[a№142] Loladze T.N., Batiashvili B.L. Low temperature precision grinding and outlook of its development // Ln: CIPR Ann. - 1982, 31. № 1. - P. 205-210. {Book: Date 02/09/02 Time 18:39:20}

**Примечание [V173]:** Стр: 40  
[a№3061] Епифанов В.И., Песина А.Я., Зыков Л.В. Технология обработки алмазов в бриллианты. - М.: Высш. шк., 1984. - 319 с. {Book: Date 31/08/02 Time 22:20:38}

**Примечание [V174]:** Стр: 40  
[a№143] Profiliermaschine fur Diamantschleifscheiben // Ln: Maschine. - 1983, 37. № 5. - P. 54. {Book: Date 31/08/02 Time 22:22:10}

**Примечание [V175]:** Стр: 40  
[a№3165] Способ шаржирования поверхностей: А.с. 982872 СССР, МКИ В 24 В 1/00. / Л.А. Сагарда, В.В. Маковецкий; Опубл. 1982, Бюл. № 47. {Book: Date 31/08/02 Time 22:23:41}

**Примечание [V176]:** Стр: 40  
[a№3061] Епифанов В.И., Песина А.Я., Зыков Л.В. Технология обработки алмазов в бриллианты. - М.: Высш. шк., 1984. - 319 с. {Book: Date 22/08/02 Time 23:53:44}

**Примечание [V177]:** Стр: 40  
[a№832] Киселева Л.Н. Технические алмазы. - М.: Недра, 1964. - 154 с. {Book: Date 31/08/02 Time 22:26:28}

**Примечание [V178]:** Стр: 40  
[a№69] Основы алмазного шлифования / Семко М.Ф., Грабченко А.И., Раб А.Ф., Узунян М.Д., Пивоваров М.С. - К.: Техника, 1978. - 192 с. {Book: Date 31/08/02 Time 22:28:12}



Поскольку объектом изучения и в том и в другом случае является алмаз, то все эти работы в той или иной степени вскрывают различные проявления единой природы разрушения материалов с алмазной структурой, определяемые характером и природой разрушающих воздействий. В зависимости от того, какое разрушающее воздействие преобладало в исследованиях, созданы концепции механического, термохимического, химического, диффузионного, адгезионного и др. видов разрушения алмаза [97].

Кратко сущность указанных концепций сводится к следующему. Механическое разрушение происходит за счет скольжения по плоскостям под воздействием инструмента, когда приложенные силы порождают преимущественно растягивающие и изгибающие напряжения (реже сжимающие), превышающие соответствующие пределы прочности.

Под термическим разрушением понимают активируемые высокой температурой ( $T > 500 - 600^{\circ}\text{C}$ ) процессы перехода алмаза в непрочные модификации углерода (графит, турбостатный углерод, аморфный углерод, окислы). Эффективно разрушающее воздействие острофокусированных излучений (луч лазера, электронный луч), когда кинетическая энергия потока частиц превращается в тепловую торможением и поглощением микрообъемами обрабатываемого алмаза, в результате чего из зоны обработки выбрасываются продукты испарения, мельчайшие частицы алмаза и другие модификации углерода [168].

Межфазные внутренние напряжения, возникающие из-за различия на порядок величины линейных термических коэффициентов расширения металла и алмаза, являются ответственными за дополнительное образование в поликристаллах микропор и микротрещин [118]. В результате теплового воздействия возможно расплавление металлических включений, их коагуляция и миграция на поверхность поликристалла. Убедительное экспериментальное подтверждение этому получено в работе Л. С. Палатника, Д. И. Гладких и др. [129]. После отжига поликристаллов алмаза при  $1200^{\circ}\text{C}$  в вакууме  $\sim 10^{-5}$  мм рт. ст. на его поверхности обнаружили в виде «росы» капли металла размером от нескольких десятков до сотен микрометров. Редко и преимущественно вблизи расположения катализатора такие капли металла обнаруживались нами на обработанной поверхности карбонадо после шлифования.

После нагрева в течение 3-х минут в закрытой печи, имевшей температуру  $550^{\circ}\text{C}$ , и резкого охлаждения в проточной воде термоусталостная прочность

**Примечание [V179]:** Стр: 41  
[a№3085] Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В.  
Износ алмазов и алмазных кругов. - М.:  
Машиностроение, 1967. - 112 с. {Book:  
Date 31/08/02 Time 22:29:04}

**Примечание [V180]:** Стр: 41  
[a№645] Синтетические сверхтвердые  
материалы: В 3 т. / Редкол: Н.В. Новиков... - Киев: Наук. думка, 1986. - Т.1:  
Синтез CCM. - 278 с. {Book: Date  
31/08/02 Time 22:37:03}

**Примечание [V181]:** Стр: 41  
[a№3248] Новиков Н.В., Девин Л.Н.  
Надежность лезвийных инструментов из  
ПСТМ при чистовом точении закаленных  
сталей//Сб. науч. тр. Института  
сверхтвердых материалов им.  
В.Н.Бакуля НАН Украины. Серия Г:  
Процессы механической обработки,  
станки и инструменты. - Киев,  
2002.С.273-280. {Book: Date 31/08/02  
Time 22:38:37}

**Примечание [V182]:** Стр: 41  
[a№3320] Палатник Л.С., Гладких Л.И.,  
Фукс М.Я. и др. О структуре поликристаллов  
нитрида бора после спекания  
под давлением // Синтетические алмазы.  
- 1976, - вып.1. - С. 66-69. {Book: Date  
31/08/02 Time 22:39:41}

образцов СТМ определялась по количеству циклов «нагрев – охлаждение» до появления трещин на поверхности.

Появление трещин в них наблюдалось только после 400 циклов. После 500 циклов практически на всех образцах были обнаружены отдельные микро-трещины. Результаты исследований [129] приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2 – Термоусталостная прочность СТМ

Материал	Число циклов		
	Появление микротрещин	Сетка микротрещин	Разрушение
АСБ	405470		16576000
АСПК	450485		18765000
Эльбор-Р	490	610	
ПТНБ 5МК	425	575	

По этому показателю сверхтвердые поликристаллы примерно на порядок превосходят твердые сплавы, в частности марки ВК8 [121].

Облучение кристаллитов алмаза концентрированными потоками ионов приводит к существенным изменениям как в поверхностном слое [122], так и в объеме всего кристалла [119].

Без повышенных температур невозможно химическое, диффузионное и адгезионное разрушение алмаза, поскольку все эти процессы протекают и ощущаются только в области высоких температур [98]. Химическое разрушение алмаза наблюдается при травлении его расплавами щелочей, кислородсодержащих солей, кимберлитов, других сильных окислителей. Однако, исследуемые СТМ представляют собой многофазную систему и поэтому их «податливость» при обработке в указанных условиях будет складываться из соответствующих показателей каждой фазы в отдельности, прежде всего в алмазе, как основной, доминирующей фазе поликристаллов. Различные варианты технологии химической обработки: в расплаве селитры  $\text{NaNO}_3$  при  $800^\circ\text{C}$  [169]. Процесс интенсивного окисления начинается при температурах свыше  $600^\circ\text{C}$ . В результате окисления в парах воды с катализатором расплав КОН и при температуре  $710^\circ\text{C}$  за два часа обработки потеря веса алмаза составила всего около 3.0 %. В пересчете на линейное измерение при односторонней направленности эта величина составит лишь доли процента.

Диффузионное разрушение происходит при определенных условиях, когда возможна диссоциация кристаллической решетки алмаза, появление атомарного углерода и его диффузия в контактирующий материал. На этом поло-

**Примечание [V183]:** Стр: 42

[a№3126] Новиков Н.В., Майстренко А.Л. Трещиностойкость кристаллических и композиционных сверхтвердых материалов // Сверхтвердые материалы. - 1985. - № 7. - С. 18-21. {Book: Date 31/08/02 Time 22:41:19}

**Примечание [V184]:** Стр: 42

[a№3057] Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н. Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов. - Киев: Наук. думка, 1993. - 220 с. {Book: Date 31/08/02 Time 22:41:56}

**Примечание [V185]:** Стр: 42

[a№3013] Новиков Н.В., Дуб С.Н., Мальнев В.И. Трещиностойкость монокристаллов алмаза // Сверхтвердые материалы. - 1992. - № 5. С. 6-11. {Book: Date 31/08/02 Time 22:42:25}

**Примечание [V186]:** Стр: 42

[a№317] Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В. К теории диффузионного износа алмазного абразивного инструмента // Тр. ВНИИАШ. - 1985. - № 5. - С. 103-112. {Book: Date 31/08/02 Time 22:43:13}

**Примечание [V187]:** Стр: 42

[a№1091] Синтетические сверхтвердые материалы: В 3 т. / Редкол: Н.В. Новиков... - Киев: Наук. думка, 1986. - Т.2: Композиционные инструментальные СМ. - 262 с. {Book: Date 31/08/02 Time 22:45:15}

жении основана диффузионная теория износа алмазного инструмента, предложенная Т. Н. Лоладзе и Г. В. Бокучава [97]. Интересные результаты диффузионного формообразования сложных изделий из алмаза получены в работе [171].

Представляется правильным с позиций определения путей повышения обрабатываемости материалов с алмазными структурами учитывать весь комплекс возможных разрушающих факторов в тех или иных конкретных способах обработки с целью усиления действия каждого из них или их совокупности.

Наиболее общим в процессах механической обработки является то, что расчленение кристаллов алмаза на части, обработка поверхностей, формирование отверстий выполняется рабочими инструментами с обязательным присутствием кристалла алмаза или алмазного порошка. Так, механическое распиливание кристаллов на распиловочных станках производится бронзовым диском толщиной 0.04 – 0.09 мм, шаржированными алмазным порошком АСМ 20, с прованским или касторовым маслом при линейной скорости порядка 45 – 60 м/с и усилии прижима 120 – 300 г. Обработка плоских поверхностей чаще всего выполняется на крупных дисках, шаржированных алмазными зернами. Сверление отверстий производится стальной иглой, шаржированной алмазным порошком.

Во всех этих процессах характеристика алмазных зерен, их количество и частота смены играют важную роль. Так, с увеличением зернистости от АСМ 6 до АСМ 28 съем припуска алмазов увеличился от 1.07 до 2.77 мг/мин. Однако, с течением времени в связи с «приработкой» зерен производительность снизилась более чем вдвое [167].

Все исследователи отмечают принципиальную важность учета ориентации кристаллографических плоскостей обрабатываемого алмаза. При распиливании плоскость распила должна быть параллельна плоскости куба и ромбододекаэдра [34]. Замечено, что разрушение обрабатываемой поверхности при обдирке алмаза алмазом происходит непосредственно за обдирающими элементами в направлениях, нормальных к плоскости (111) [43]. При огранке и шлифовании производительность определяется не только различной твердостью кристаллографических плоскостей, но и направлением шлифующих зерен круга. Это различие может быть стократным [165].

Среди не абразивных способов обработки природных алмазов применение нашли электрофизические, термические и др., основанные на тех или иных физических, химических и иных разрушающих воздействиях.

**Примечание [V188]:** Стр: 43  
[a№3085] Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В. Износ алмазов и алмазных кругов. - М.: Машиностроение, 1967. - 112 с. {Book: Date 31/08/02 Time 22:46:59}

**Примечание [V189]:** Стр: 43  
[a№3249] Сирадзе А.М. Исследования обрабатываемости алмаза. Тбилиси, изд. ГПИ им. Ленина, 1975. 185 с. {Book: Date 31/08/02 Time 22:49:13}

**Примечание [V190]:** Стр: 43  
[a№926] Синтетические алмазы в промышленности. - Киев: Наукова думка, 1974. - 327 с. {Book: Date 31/08/02 Time 22:52:23}

**Примечание [V191]:** Стр: 43  
[a№16] Грабченко А.И. Хрупкое макро-разрушение синтетических поликристаллов алмаза в процессе шлифования // Резание и инструмент, Вып. 19. - 1978. - С. 134-140. {Book: Date 03/09/02 Time 13:46:11}

**Примечание [V192]:** Стр: 43  
[a№3056] Григорьев О.Н., Мильман Ю.В., Трефилов В.И. Разрушение алмаза при локальном нагружении // Алмазы и сверхтвердые материалы. - 1980. - № 3. - С. 30-34. {Book: Date 31/08/02 Time 22:54:32}

**Примечание [V193]:** Стр: 43  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 31/08/02 Time 22:56:41}

Так, электроэрозионная резка основана на предварительной графитизации алмаза по линии разреза за счет электрического разряда между игольчатыми электродами. Ультразвуковые колебания вращающегося диска с амплитудой 3 – 5 мкм интенсифицируют процесс разрезки алмазов.

Шлифование с использованием энергии электрического тока [60] осуществляется по схеме, при которой между закрепленным в оправке алмазом и ограничным диском создается высоковольтная дуга, интенсифицирующая процесс обработки. Диск, шаржированный порошком зернистостью 25/40 мкм, вращается со скоростью 2000 – 2500 об/мин. Производительность такого способа в 2.5 – 4 раза выше базового.

Весьма перспективна обработка алмазов электронными и лазерными лучами. Она оказалась весьма эффективной при формировании отверстий, а в ряде случаев и при разделе кристаллов. Обработка отверстий или разделение кристалла предполагают последовательное периодическое удаление элементарных объемов алмаза.

С возникновением необходимости изыскания эффективных методов обработки СТМ опыт обработки природных алмазов, конечно, был определяющим. Именно этим объясняются первоначальные попытки использовать процесс шлифования шаржированными дисками или алмазными кругами при изготовлении режущего и выплаивающего инструмента из поликристаллических СТМ [60]. Оказалось, что производительность шлифования поликристаллов АСБ на чугунном диске, шаржированном алмазным порошком АМ 28 – А 12, в 210 раз ниже, чем при огранке природного алмаза в «мягком» направлении кристалла [165]. Резкое падение производительности отмечено в первые 5 – 6 минут работы, после чего процесс съема практически прекращается. Здесь, видимо, сказалось то обстоятельство, что режущие алмазные зерна непременно вынуждены контактировать с кристаллитами преимущественно в «твердом» направлении.

Вместе с этим определились направления поиска интенсификации обработки сверхтвердых поликристаллов: 1) шлифование алмазными кругами на органических и металлических связках; 2) шлифование с предварительным подогревом обрабатываемого поликристалла; 3) шлифование алмазными кругами на металлической связке с введением в зону обработки активных окислителей; 4) комбинированное алмазное шлифование (электроалмазное, катодное алмазное шлифование) [210]; 5) обработка лазером.

**Примечание [V194]:** Стр: 44  
[a№3061] Епифанов В.И., Песина А.А., Зыков Л.В. Технология обработки алмазов в бриллианты. - М.: Высш. шк., 1984. - 319 с. {Book: Date 31/08/02 Time 23:00:35}

**Примечание [V195]:** Стр: 44  
[a№3061] Епифанов В.И., Песина А.А., Зыков Л.В. Технология обработки алмазов в бриллианты. - М.: Высш. шк., 1984. - 319 с. {Book: Date 31/08/02 Time 23:00:35}

**Примечание [V196]:** Стр: 44  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 31/08/02 Time 23:02:39}

**Примечание [V197]:** Стр: 44  
[a№966] Электроалмазное шлифование инструментальных материалов / М.Ф. Семко, А.И. Грабченко, Н.В. Левченко, А.Ф. Раб - К.: Вища школа, 1974. - 120 с. {Book: Date 31/08/02 Time 23:04:40}



Перспективным представляется использование высокоэффективного инструмента, разработанного в институте сверхтвердых материалов [186].

Отметим, что классические процессы шлифования превосходят процесс огранки по производительности. Несмелов А. Ф. [114] объясняет это существенно более высокой концентрацией алмазов в круге по сравнению с шаржированным диском, вступлением в работу все новых зерен, т. е. самозатачиванием круга, более прочным закреплением алмазов в круге. Как показала практика, проявляется самозатачивание алмазных кругов при шлифовании СТМ в весьма специфических условиях, требующих специальных технологических приемов. Второе его условие противоречит первому, т. к. прочное удержание зерен приводит к быстрой потере режущей способности.

Таким образом, рассматривая поликристаллические СТМ как самостоятельную группу труднообрабатываемых материалов, учитывая их состав и структуру, можно констатировать сопоставимость трудоемкости их обработки с трудоемкостью обработки природных алмазов [165]. В то же время объемы обработки СТМ значительно превышают эти показатели для природных алмазов, что еще раз подчеркивает актуальность изыскания эффективных методов обработки СТМ.

Учитывая потребности крупносерийного и массового производства инструмента из СТМ, базирование технологии инструментального производства (в частности, заточки) на операциях шлифования, а также результаты проведенного сравнения существа и выходных показателей различных методов обработки СТМ и природных алмазов, целесообразно принять алмазное шлифование в качестве базового процесса для изучения обрабатываемости СТМ и изыскания на этой основе высокоэффективных способов их обработки.

## 1.7. Принципиальные особенности процесса алмазного шлифования сверхтвердых материалов

В настоящее время задачи поверхностного диспергирования при алмазном шлифовании сверхтвердых поликристаллических материалов, являющиеся исключительно сложными и многообразными, решаются в основном эмпирическим путем с большими затратами и не всегда оптимально. Следует исходить из установленных особенностей процесса алмазного шлифования СТМ [36]:

**Примечание [V198]:** Стр: 45  
[a№3257] Філатов Ю.Д. Наукові основи  
прецизійного полірування поверхонь  
деталей з кремнеземвміщуючих ма-  
теріалів: Дис...докт. техн. наук: 05.03.01 /  
Ін-т надтвердих матеріалів НАН  
України. - К., 1996. - 35 с. {Book: Date  
22/08/02 Time 23:59:06}

**Примечание [V199]:** Стр: 45  
[a№3257] Несмелов А.Ф. Алмазные  
инструменты в промышленности. -  
М.:Машиностроение, 1964. - 343 с.  
{Book: Date 31/08/02 Time 23:09:33}

**Примечание [V200]:** Стр: 45  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И.,  
Ходоревский М.Г. Алмазное шлифова-  
ние синтетических сверхтвердых мате-  
риалов. - Харьков: Вища школа, 1980. -  
192 с. {Book: Date 31/08/02 Time  
23:10:31}

**Примечание [V201]:** Стр: 45  
[a№3006] Грабченко А. И. Научные  
основы алмазного шлифования сверх-  
твердых поликристаллических материа-  
лов: Диссертация в форме научного  
доклада докт. техн. наук: 05.03.01. -  
Харьков, 1995. - 59 с. {Book: Date  
03/09/02 Time 22:29:58}

1. Соотношение твердостей обрабатываемого (ОМ) и инструментального (ИМ) материалов существенно не отличается от единицы, а, значит, нет традиционного углубления режущего клина в обрабатываемый материал, нет понятия сечения среза, стружка представляет собой микроскопическую пыль. Кроме того, ОМ и ИМ имеют самые высокие в природе физико-механические свойства, присущие алмазным структурам.

2. Одно из контактирующих практически равнотвердых тел (алмазное зерно) находится в упругой среде (металлической связке).

3. Топография контактирующих поверхностей существенно различается – одна СТМ – квазисплошная, другая поверхность круга – дискретная.

4. Контактное взаимодействие следует рассматривать на макроуровне – СТМ – РПК и микроуровне СТМ – субмикрорельеф алмазных зерен.

Предложенная Б. И. Костецким [85] (для трибологии и процессов финишной алмазной обработки) теория поверхностной прочности и разрушения как отражение фундаментального универсального явления приспособляемости материалов при контактном нагружении и ее инверсии может быть использована при разработке научных основ и эффективных технологических процессов алмазного шлифования СТМ. Известно понятие приработки поверхностей в деталях машин. Классические этапы износа – «приработка – нормальный износ – катастрофический износ». Однако своеобразие традиционного процесса алмазного шлифования СТМ кругами на металлических связках состоит в том, что здесь первый этап – аналогичен этапу катастрофического износа (процесс производительного съема после правки круга), который через переходной этап за 1 – 2 минуты самопроизвольно трансформируется в стабильный процесс истирания пары «алмаз–алмаз», где ответственными за износ становятся термоактивируемые процессы (графитизация, окисление и т.д.).

Приспособляемость – более широкое понятие, чем прирабатываемость, поскольку охватывает весь комплекс физических явлений, происходящих в зоне контакта, а не только интенсивность взаимного износа контактирующих поверхностей. В трибологии процесс приработки рассматривается как явление – положительное, а в алмазном шлифовании (как будет показано ниже) приспособляемость имеет двоякий характер. Для производительного шлифования СТМ – это отрицательное явление и с ним надо бороться, а для прецизионного – положительное. Следовательно, в рамках единой технической системы, первый и второй этапы приспособляемости при алмазной обработке СТМ необходимо рассматривать с позиций теории шлифования хрупких материалов, а

**Примечание [V202]:** Стр: 46  
[a№3155] Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении. - Киев.: Техніка, 1976. - 232 с. {Book: Date 12/07/02 Time 09:27:22}

третий этап – с позиции трибологии. Границы второго переходного этапа не столь четко определены.

Поскольку алмазное шлифование СТМ по своей физико-механической природе во многом аналогично процессам трения и износа, процесс взаимодействия системы элементов «СТМ–зерно–связка» рассматриваем с использованием закономерностей трибологии.

С позиций трибологии рассматривал процесс шлифования и Г. В. Бокучава [15]. Но поскольку исследовалась обработка других групп материалов, в основном более мягких, то и исследовались такие виды износа, как адгезионный и диффузионный. Изучаемый нами процесс – это микроразрушение элементов системы «СТМ – алмазное зерно – связка» при высокоскоростном контактном взаимодействии, что и предопределяет специфику приспособляемости поверхностей тел с алмазной структурой, от которой зависит уровень выходных показателей.

Таким образом, методология изучения процесса алмазного шлифования СТМ может базироваться на законах трибологии и шлифования и должна обеспечить вскрытие природы приспособляемости, закономерностей ее развития и определение путей управления ею с целью повышения эффективности обработки.

Рассмотрим процесс алмазного шлифования СТМ как замкнутую техническую систему. Это означает, что необходимо исследовать не только влияние параметров РПК на выходные показатели, но одновременно и влияние физико-механических свойств топографии поверхности СТМ на РПК. Замкнуть эту систему можно через параметры приспособляемости: 1) топографической – изменение различных параметров топографии рабочей поверхности круга (РПК) и СТМ; 2) энергетической – изменение сил резания, мощности и коэффициента шлифования (Кш), энергоемкости процесса; 3) структурно-фазовой – изменение соотношения в контакте «твердых» и «мягких» граней кристаллитов СТМ и алмазных зерен, миграция к поверхности металлофазы, графитизация и окисление взаимодействующих поверхностей и др.

Большие значения удельной энергии атомарной связи в кристаллической решетке алмаза следует рассматривать как физическую основу высокой энергоемкости процессов обработки этих материалов, а самую высокую твердость как фактор, не позволяющий обеспечить необходимое соотношение ее твердости и твердости инструментального материала. Это требует нового подхода к созда-

**Примечание [V203]:** Стр: 47  
[a№280] Бокучава Г.В. Трибология процесса шлифования. - Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1984. - 238 с. {Book: Date 12/07/02 Time 09:30:16}

нию процессов обработки сверхтвердых материалов на базе новой методологии исследования их обрабатываемости.

Предлагаемая методология базируется на нескольких принципах и прежде всего на физическом представлении о том, что интенсивность съема шлифуемого сверхтвердого материала различна для различных этапов структурно-топографической приспособляемости взаимодействующих поверхностей – рабочей поверхности алмазного круга и СТМ. На первом (после правки круга), когда рабочая поверхность круга имеет исходные характеристики, основной съем шлифуемого СТМ осуществляется не в результате внедрения в него алмазных зерен и их относительного перемещения, а преимущественно вследствие хрупкого микроразрушения в процессе массового высокоскоростного воздействия субмикроромок алмазных зерен круга и создания высоких напряжений в локальных объемах, примыкающих к пятну хрупкого контакта, а также вследствие волновых процессов и циклических нагрузок [165]. Острые элементы субмикрорельефа в условиях дискретного контакта порождают «очаги» сосредоточенной нагрузки в пределах отдельных кристаллитов и обуславливают в результате хрупкого микроразрушения отделение от поликристалла весьма малых объемов с высокой степенью их дисперсности. На втором, переходном этапе структурно-топографической приспособляемости, когда на выступающих зернах сформировались площадки износа, картина усложняется: уплощенные зерна играют роль своеобразных опорных элементов, воспринимают на себя все большую и большую нагрузку, препятствуя острым менее выступающим зернам произвести съем материала с исходной интенсивностью. Согласно Д. Муру [226], коэффициент трения алмаза по алмазу с увеличением давления падает и описывается в диапазоне нагрузок  $P_H = 0.5 - 0.7$  Н зависимостью  $f = K P_H^{-1/3}$ , а при дальнейшем повышении начинает расти (описывается обратной зависимостью), что связывают предположительно с растрескиванием поверхности алмаза, которое увеличивает сопротивление скольжению. Таким образом, на втором этапе структурно-топографической приспособляемости интенсивность съема подчиняется законам механики микроразрушения и трибологии.

На третьем этапе приспособляемости высота выступления зерен над связкой столь мала, что становится возможным трение обрабатываемого поликристалла с алмазными площадками зерен и с участками металлической связки.

**Примечание [V204]:** Стр: 48  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 30/08/02 Time 06:33:28}

**Примечание [V205]:** Стр: 48  
[a№3146] Moore D. Principles and Applications of Tribology. - М.: Мир, 1978. - 487 с. {Book: Date 29/08/02 Time 17:01:45}

При этом надо учитывать, что коэффициент трения алмаза по алмазу и алмаза по металлу зависит от скорости скольжения и чистоты контакта [35]:

	на воздухе	в вакууме
алмаз–алмаз	0.05	0.3 – 0.5
алмаз–металл	0.4–0.6	1 – 3

Примечание [S206]: МУР

На поверхностях пятен контакта возникают вспышки высокой температуры, в условиях которых алмаз может графитизироваться и окисляться, что обуславливает съем шлифуемого поликристалла с интенсивностью, характерной для процессов полирования.

Таким образом, приспособляемость реализуется через смену преобладающих механизмов разрушения СТМ при алмазном шлифовании – от хрупкого микроразрушения с удалением мелкодисперсных частиц до атомно-молекулярного съема в условиях фрикционного нагрева. Термоактивируемые трением процессы графитизации и окисления создают предпосылки для разработки способов прецизионной и ультрапрецизионной обработки.

В силу сказанного изучение структурного аспекта механики и физики микроразрушения сверхтвердых материалов, независимо от того, на какой основе они созданы (алмаз, нитриды, бориды, карбиды), является важнейшим исходным принципом предлагаемой методологии.

Второй принцип основан на положении о том, что совокупность элементов «шлифуемый СТМ – алмазное зерно – связка» функционируют как единая пространственная 3D система. Это предполагает изучение скорости и форм проявления приспособляемости рабочей поверхности кругов во взаимосвязи с обрабатываемым материалом и условиями обработки. Цель его реализации – установление закономерностей, позволяющих количественно оценить изменения исходного состояния топографии РПК и СТМ на первом, втором и третьем этапах приспособляемости: изменение количества зерен на поверхности РПК, контактирующих зерен, зерен с площадками, зерен с развитой поверхностью, относительной опорной площади, размеров площадок износа, высоты выступающих зерен, субмикрорельефа поверхности зерен и их площадок и т. д. Особую важность здесь приобретает значение размерного износа зерен на различных этапах приспособляемости, т.к. он определяет потенциальную размерную точность изделия, расстояние между объектом шлифования и связкой, возможность контактирования связки с обрабатываемым материалом [32, 33].

Примечание [V207]: Стр: 49  
[a№3147] Кундрак Я. Производство, применение и заточка лезвийных инструментов из сверхтвердых материалов (венг.). - Zaroszimposium Budapest. 1991, p.168-185. {Book: Date 17/02/02 Time 18:43:51}

Примечание [V208]: Стр: 49  
[a№3148] Kundra J., Szabo Z. Process, method and equipment for grinding of hard materials. - Technology'92, Kassa, 1992, sept.8, p.224-227. {Book: Date 17/02/02 Time 18:45:42}

Третий принцип: протекание физических явлений в зоне шлифования и выходные показатели обработки имеют глубокую взаимосвязь с параметрами рабочей поверхности круга и СТМ, а поэтому их динамика является отражением интенсивности этапов структурно-топографической приспособляемости. Этому принципу противоречат имеющиеся во многих учебниках определения шлифовальных кругов как инструмента с неуправляемой геометрией.

Четвертый принцип: возможность стабилизировать то или иное состояние РПК, приостановить процесс приспособляемости на требуемом уровне ее интенсивности вплоть до полного предотвращения. Установление трех этапов и сути структурно-топографической приспособляемости РПК при шлифовании сверхтвердых материалов, закономерностей, отражающих связь параметров РПК с выходными показателями, создают основу, необходимую и достаточную для разработки способов управления интенсивностью и этапами приспособляемости и оптимизации процесса обработки по любому из выходных показателей шлифования. Для достижения максимального эффекта управление РПК необходимо осуществлять как на микроуровне (высота выступания зерен над связкой ( $h_p$ ), относительная опорная площадь поверхности ( $t_{ps}$ ) и т. д.) путем дозируемого удаления связки [32], так и на микроуровне – путем целенаправленного, принудительного формирования субмикрорельефа рабочей поверхности алмазных зерен.

Пятый принцип: связку алмазных кругов необходимо рассматривать как элемент многоцелевого назначения. Это прочность удержания зерен, принудительное формирование макропрофиля РПК, упругое или пластическое деформирование под влиянием силы на единичном зерне, характер явлений в непосредственном контакте зерна с обрабатываемым поликристаллом.

Шестой принцип: при изучении процессов взаимного микроразрушения элементов системы «СТМ–зерно–связка» следует учитывать анизотропию свойств кристаллитов СТМ и алмазных зерен. Учет анизотропии, как известно [60], положен в основу обработки природных алмазов в бриллианты. Это обусловлено тем, что величина пятна упругого контакта зерен с СТМ на несколько порядков меньше размеров их кристаллитов, что дает основание учитывать обработку отдельно взятого из них [165].

Седьмой принцип: широкое применение моделирования. Прямой эксперимент в настоящее время весьма дорогостоящий и труднопроизводимый. Моделирование в значительной мере облегчает процесс исследования, сокра-

**Примечание [V209]:** Стр: 50  
[a№3006] Грабченко А. И. Научные основы алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов: Диссертация в форме научного доклада докт. техн. наук: 05.03.01. - {Book: Date 04/02/02 Time 21:45:45}

**Примечание [V210]:** Стр: 50  
[a№3061] Епифанов В.И., Песина А.Я., Зыков Л.В. Технология обработки алмазов в бриллианты. - М.: Высш. шк., 1984. - 319 с. {Book: Date 12/07/02 Time 09:32:50}

**Примечание [V211]:** Стр: 50  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Виша школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 12/07/02 Time 09:33:58}



щает время, позволяет в большом диапазоне варьировать условия. Применение 3D моделирования открывает новые возможности в изучении процесса алмазного шлифования СТМ.

## Выводы

Изложенное свидетельствует о важном народно-хозяйственном значении задачи повышения эффективности обработки большой группы синтетических сверхтвердых материалов.

Важные результаты в предметной области алмазно-абразивной обработки сверхтвердых материалов получены научной школой НТУ «Харьковский политехнический университет» и отражены в работах авторов и их коллег И. Н. Пыжова [147], М. Г. Ходоревского [199], Н. Ф. Наконечного [113], В. В. Русанова [155], Е. В. Островерха [134], В. Л. Доброскока [54], М. Г. Магазеева [35] и др.

К настоящему времени выявлено много свидетельств тому, что процесс алмазного шлифования СТМ следует рассматривать с точки зрения приспособляемости 3D взаимодействующих поверхностей и решения проблемы управления ею во всем диапазоне, используя достоинства и устраняя недостатки каждого из них. Именно на этой основе следует решать основное технологическое противоречие, связанное с проблемой повышения производительности алмазного шлифования СТМ с одной стороны и сокращения расхода дорогостоящих алмазных зерен, повышения качества обработанной поверхности и надежности заточенного лезвийного инструмента из СТМ с другой стороны. Предложенные ранее способы шлифования СТМ с управлением режущим рельефом круга, явившееся значительным шагом вперед, все же не позволяют в полной мере реализовать высокие потенциальные режущие свойства дорогостоящих алмазных зерен вследствие неполного решения проблемы устранения отрицательного влияния площадок износа на них и периодичности процесса шлифования.

Отсутствует обобщенная пространственная модель процесса шлифования в условиях, когда практически не существенно внедрение инструментального материала в обрабатываемые, которые имеют предельную в природе твердость, присущую алмазным структурам. Применявшийся ранее дифференцированный подход к процессам шлифования и разрушения отдельных алмазных зерен,

**Примечание [V212]:** Стр: 51  
[a№3042] Пыжов И.Н. Алмазное шлифование двухслойных сверхтвердых композиционных материалов: Дис... канд. техн. наук: 05.03.01.- Харьков. - 1983. - 247 с. {Book: Date 31/08/02 Time 23:47:14}

**Примечание [V213]:** Стр: 51  
[a№3326] Ходоревский М.Г. Исследование процесса алмазного шлифования синтетических сверхтвердых материалов: Дис... канд. техн. наук: 05.03.01. - Х., 1975. - 214 с. {Book: Date 31/08/02 Time 23:47:59}

**Примечание [V214]:** Стр: 51  
[a№48] Наконечный Н.Ф. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования кругами на металлических связках: Дис... канд. техн. наук: 05.03.01. - Харьков, 1984. {Book: Date 31/08/02 Time 23:49:03}

**Примечание [V215]:** Стр: 51  
[a№64] Русанов В.В. Исследование физических явлений и качества поверхности при алмазном шлифовании композиций «СТМ - сталь»: Дис... канд. техн. наук. - Харьков, 1980. - 259 с. {Book: Date 31/08/02 Time 23:49:47}

**Примечание [V216]:** Стр: 51  
[a№421] Островерх Е.В. Тепловые явления и качество поверхностного слоя при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: Автореф. дис... канд. техн. наук. - Киев, 1986. - 17 с. {Book: Date 31/08/02 Time 23:50:34}

**Примечание [V217]:** Стр: 51  
[a№153] Доброскок В.Л. Повышение стабильности процесса шлифования путем управления рельефом рабочей поверхности алмазных кругов: Дис... канд. техн. наук, Ростов на Дону, 1986. - 253 с. {Book: Date 31/08/02 Time 23:51:52}

**Примечание [V218]:** Стр: 51  
[a№710] Грабченко А.И., Магазеев М.Г., Мамалис А. Сравнительные стойкостные испытания алмазных резцов, заточенных комбинированным методом // Високи технології в машинобуд.: Зб. наук. пр. ХДПУ. - Х.: ХДПУ, 1998. - С. 82-85. {Book: Date 31/08/02 Time 23:53:08}

определения критической величины их заделки в связке и глубины внедрения в обрабатываемый материал не позволял учитывать взаимовлияние геометрических параметров и физико-механических свойств зерен, обрабатываемого материала и связки на эффективность их взаимного микроразрушения. Решение плоской задачи (по сравнению с 3D моделированием) снижало достоверность получаемых результатов. Только изучение зоны шлифования как единой системы «СТМ–зерно–связка» с применением 3D моделирования позволит учесть взаимовлияние элементов этой системы, использовать закономерности, разработанные для процессов трения и износа, учесть упругое демпфирование металлической связки, анизотропии свойств алмазных структур, оценить величину фактической площади контакта в системе «РПК – СТМ», повысить достоверность результатов и разработать теоретический и экспериментальный модули экспертной системы процесса алмазного шлифования СТМ.

Более реалистичному описанию процесса шлифования СТМ также будет способствовать применение последних достижений теории механики контактного разрушения (МКР), пакетов прикладных программ по различным расчетным методам, прежде всего конечных элементов (МКЭ). Практический расчет созданных математических моделей с получением количественных результатов возможен с использованием современных ЭВМ.



## Глава 2

### Методологические основы изучения процесса шлифования в трехмерном (3D) представлении

В главе изложена методология и методики комплексного исследования 3D единой системы «СТМ–зерно–связка», включающие 3D моделирование и экспериментальное изучение 3D параметров взаимодействующих поверхностей, изучение 3D напряженно-деформированного состояния (НДС) зоны алмазного шлифования. Разработан ряд оригинальных методик, основанных на 3D теоретическом и экспериментальном изучении изменений параметров рабочей поверхности круга и обрабатываемого СТМ в процессе их приспособливания: определения динамической прочности алмазных зерен, оценки уровня приспособливаемости, изучения усталостно-циклического разрушения СТМ и зерен с наложением ультразвуковых колебаний, оценки коэффициента использования алмазных зерен, определения фактической площади контакта в системе «РПК – СТМ», компьютерного цветометрического определения параметров РПК и дефектов на поверхности СТМ путем сканирования цветных фотографий полученных в поляризованном свете. Впервые применено 3D моделирование напряженно-деформированного состояния единой системы «СТМ–зерно–связка» методом конечных элементов, а для изучения параметров топографии рабочей поверхности круга и СТМ использован метод лазерного сканирования.

#### 2.1. Процесс приспособливаемости и управление рельефом кругов при алмазно-абразивной обработке

Разработка Б. И. Костецким [85] теории поверхностной прочности и разрушения тесно связана с развитием представлений об универсальном явлении структурной приспособливаемости материалов при контактном нагружении и ее инверсии, открытого в результате большого комплекса исследований и обобщения опыта промышленности. Это фундаментальное явление обусловлено

**Примечание [V219]:** Стр: 53  
[a№3155] Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении. - Киев.: Техніка, 1976. - 232 с. {Book: Date 24/08/02 Time 01:24:56}

энергетической целесообразностью перестройки исходной структуры поверхностных слоев материалов в устойчивую форму, энергетически наиболее выгодную для данных условий нагружения [87].

При этом наступает динамическое равновесие и саморегулирование всей термодинамической системы: происходит стабилизация всех явлений контактных взаимодействий. Приспособляемость реализуется для всех материалов и условий среды в определенных диапазонах параметров нагружения (давления и скорости относительного перемещения). Изложенные представления являются фундаментальной основой для построения физической теории поверхностной прочности и разрушения. В области технических приложений эти представления позволяют решать две группы задач: обеспечение надежности и долговечности узлов трения при эксплуатации машин; разработка эффективных технологических процессов финишной обработки деталей машин.

Вторая возможность связана с инверсией структурной приспособляемости – использованием этого явления в направлении интенсификации поверхностного разрушения.

Главным условием оптимального использования любого инструментального материала является такое состояние системы инструмент – обрабатываемый материал, при котором рабочие поверхности инструментов будут находиться в условиях структурной приспособляемости, а поверхности обрабатываемого материала в условиях ее нагружения и ослабления защитных функций вторичных структур.

Зная основные внутренние механизмы структурной приспособляемости – активацию и пассивирование – и влияние на эти механизмы сред и условий нагружения, можно вызывать нарушение динамического равновесия процессов образования и разрушения защитных пленок при операциях финишной технологической обработки материалов и обеспечивать этим оптимальное диспергирование поверхностных объемов. Это достигается стимулированием процессов активации и подавлением процессов пассивирования.

Вторым примером использования инверсии структурной приспособляемости при финишных операциях путем изменения состава среды является резкое увеличение производительности при доводке. При отсутствии возможности восстановления на обрабатываемой поверхности в процессе доводки защитных

**Примечание [V220]:** Стр: 54  
[a№3164] Костецкий Б.И., Беркладский Л.И. Структурная приспособляемость конструкционных материалов // Технология и организация производства. - Киев. - 1974. Вып. 4. - С. 13-14. {Book: Date 12/07/02 Time 10:35:00}

вторичных структур, экранирующих действие ПАВ, съём металла с обрабатываемой поверхности увеличивается в 1.5 – 2.0 раза.

Большие перспективы управления механизмом активации, пластической деформации и диспергирования открываются при использовании возможностей динамического воздействия на поверхностные слои обрабатываемых материалов. Характер приложения нагрузки существенно влияет на протекание структурной приспособляемости, смещая кинетические параметры динамического равновесия и саморегулирование всех процессов, обуславливающих поверхностную прочность. По мнению Б. И. Костецкого [72] быстротекающие колебательные процессы в звуковом и ультразвуковом диапазонах приводят к резкому повышению уровня активации и нарушения физико-химического экранирования поверхностей обрабатываемого материала. При этом изменяются параметры эпюры напряжений, как следствие этого – механизмы разрушения, резко усиливается диспергирующее действие поверхностно-активных веществ, увеличиваются скорости химических реакций.

Увеличение уровня активации в связи с динамикой нагружения может быть достигнуто разными путями. Это положение доказано и использовано нами в управляемых процессах ультразвукового алмазного шлифования СТМ.

Проведенные исследования особенностей динамики рабочих процессов при алмазно-электролитическом шлифовании показали, что изменение спектра вибраций можно достигнуть применением разных схем шлифования (упругая, жесткая), наличием осцилляций, варьированием мощности. Картина напряженно-деформированного состояния обрабатываемой поверхности и химическая активация поверхностных слоев существенно зависят от характеристик динамического качества станка (жесткость, виброустойчивость), точности установки круга.

Разработанная авторами с сотрудниками методология управления процессом шлифования и способы ее реализации позволили существенно расширить технологические возможности процесса алмазно-абразивной обработки [33]. Однако остались не до конца решенными проблемы невысокой производительности обработки, низкого коэффициента использования дорогостоящих алмазных зерен и, как следствие, высокой себестоимости, например, заточки лезвийного инструмента из СТМ. Требуется решения проблема невысокой

**Примечание [V221]:** Стр: 55  
[a№3037] Костецкий Б.И., Шульман А.П., Ляшко В.А., Носовский И.Г. Инверсия структурной приспособляемости в процессах финишной алмазной обработки // Синтетические алмазы - ключ к техническому прогрессу. - Киев. - 1977. Ч.1, - С. 273-279. {Book: Date 12/07/02 Time 10:39:25}

**Примечание [V222]:** Стр: 55  
[a№284] Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. - Харьков: Вища шк., 1985. - 184 с. {Book: Date 24/08/02 Time 01:37:13}

надежности такого инструмента, что сдерживает его применение в автоматизированном производстве. Недостаточное качество режущих элементов сверхтвердого лезвийного инструмента не позволяет полностью заменить применение природного алмаза.

## **2.2. Обеспечение комплексного подхода к исследованию процесса топографической, структурно-фазовой и энергетической приспособляемости**

Разработка теоретико-экспериментальной модели на этапе определения фактической площади контакта РПК и обрабатываемой СТМ базировалась на исследовании топографии поверхностей путем лазерного сканирования и компьютерной обработки. При изучении напряженно-деформированного состояния системы «СТМ – зерно – связка» применено 3D моделирование. Таким образом, все подсистемы, описывающие процесс приспособляемости, структурно и логически с помощью компьютерных технологий взаимосвязаны прямой и обратной связью и работают как единая теоретико-экспериментальная экспертная система (см. гл. 8).

В экспериментальных исследованиях комплексность подхода заключалась в одновременном (синхронном по периоду шлифования) фиксировании сил резания, мощности шлифования, фактической площади контакта, температуры в зоне шлифования, параметров макро- и микрорельефа РПК и СТМ. Экспериментальные исследования для изучаемых марок СТМ выполнены в идентичных условиях и воспроизводимы.

В качестве обрабатываемых в большей степени изучались СТМ на основе алмаза как наиболее труднообрабатываемые с различными структурными составляющими: от АСБ с размерами кристаллитов до 300 мкм до мелкодисперсных композиционных типа СКМ (0.1–2 мкм).

Для оптимального подбора пар «марка СТМ – марка зерна», повышения уровня использования алмазных зерен исследован их широкий диапазон от АС2 до АС100. Исследовались наиболее характерные представители СТМ на основе алмаза и нитрида бора: АСПК, АСБ, ДАП, СКМ-Р, композит-01, композит-10, ДПНБ.

В исследованиях использовались алмазные шлифовальные круги 12A2-45<sup>0</sup> (150×10×3×32) ГОСТ 16172-80 и 1A1 (250×20×3×76) ГОСТ 16167-80 с алмазными зернами от AC2 до AC100 на металлических связках M1-01, M1-03, M1-04, MO13 и M6-14 (МЖ).

При необходимости в качестве смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) применялся нейтральный электролит – водный раствор нитрида натрия ( $\text{NaNO}_3$ ) – 2 ... 10 %, углекислой соды ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) – 0 ... 10 %, триэтаноламина 0.5 ... 1 %.

Основные исследования проводились на испытательном стенде, собранном на базе универсально-заточного станка мод. 3B642 (рис. 2.1). Он обеспечивал осуществление процесса алмазного шлифования с комбинированным управлением приспособляемостью рабочей поверхности алмазных кругов и СТМ.

Поперечная подача заготовки реализовывалась по двум схемам: «упругой» и «жесткой». Работа по «упругой» схеме производилась с использованием специального столика на шариковых направляющих. Перемещение столика с закрепленной заготовкой в процессе шлифования осуществлялось под действием набора грузов до достижения упора, обеспечивающего выхаживание обрабатываемой поверхности.

При работе по «жесткой» схеме использовалось специальное устройство поперечной подачи, позволявшее производить шлифование с постоянной поперечной подачей ( $S_{\text{поп}} = \text{const}$ ) или со стабилизацией среднего значения номинальной составляющей силы резания ( $P_y = \text{const}$ ). Это позволило максимально приблизить процесс к реальному, сохранив методические возможности «упругой» [133] схемы шлифования. На столе станка устанавливался трехкомпонентный динамометр, служивший для непрерывного измерения составляющих силы резания, действующих в зоне контакта обрабатываемой заготовки со шлифовальным кругом. Выполненная модернизация оборудования обеспечивала осуществление процесса ультразвукового алмазного шлифования с адаптивным комбинированным управлением параметрами РПК за счет дозируемого целенаправленного удаления связки и ультразвукового формирования субмикрорельефа на алмазных зернах.

**Примечание [V223]:** Стр: 57  
[a№69] Основы алмазного шлифования / Семко М.Ф., Грабченко А.И., Раб А.Ф., Узунян М.Д., Пивоваров М.С. - К.: Техника, 1978. - 192 с. {Book: Date 29/08/02 Time 17:43:41 }

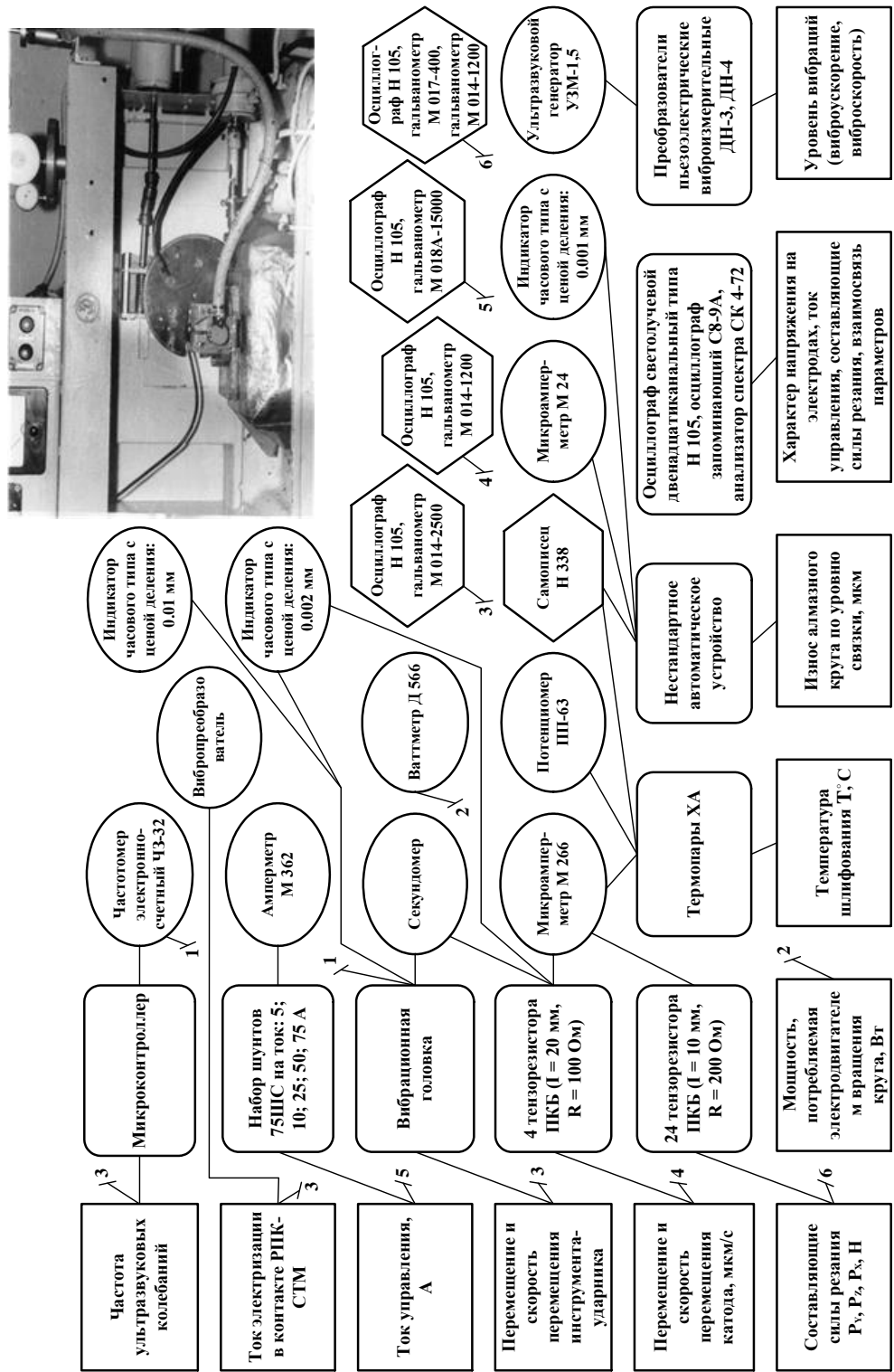


Рис. 2.1. Структура и оснащение испытательного стенда

### 2.3. Изучение 3D параметров рабочей поверхности алмазных кругов и поверхности СТМ методом лазерного сканирования

Широко применяемые методы профилографирования при исследовании параметров рабочей поверхности кругов с целью изучения изменения их в процессе износа круга имеют ряд существенных недостатков, главное из них – искажающее влияние радиуса осяупывающей иглы [54, 142].

Современная методика лазерного сканирования применительно к изучению 3D параметров топографии обработанной поверхности СТМ и РПК не только лишена этого недостатка, но и обладает рядом принципиальных достоинств.

Исследование 3D топографии рабочей поверхности алмазных кругов и поверхности СТМ проводилось на лазерном сканирующем приборе «Perthometer S8P» с лазерным датчиком модели FOCODYN, диапазон вертикального разрешения которого составлял  $\pm 250$  мкм, что вполне достаточно для измерения высотных параметров РПК кругов зернистостью до 630/500 (рис. 2.2 а). Прибор позволяет одновременно фиксировать 9 выбранных из 86 возможных параметров топографии РПК. Существенным достоинством данного прибора является синхронная компьютерная обработка результатов измерения. Данная методика резко расширяет возможности исследования, уменьшает трудоемкость и повышает точность.

С учетом анализа влияния состояния РПК на выходные показатели процесса алмазного шлифования СТМ, установленного ранее [36], нами исследовались следующие параметры (условные обозначения параметров заложены в процессоре измерительного центра и соответствуют рис. 2.2.– 2.4):  $RP$  – высота от вершины зерен до средней линии;  $RA$  – аналог стандартного параметра  $Ra$ ;  $RQ$  – среднеквадратичное отклонение профиля;  $RT$  – максимальная высота неровностей профиля;  $RSM$  – средний шаг неровностей профиля;  $RSK$  – асимметрия закона распределения неровностей профиля;  $RZISO$  – высота неровностей по десяти точкам ( $Rz$ );  $TPK$  – относительная опорная площадь поверхности;  $X$  – среднее значение параметра;  $S$  – отклонение от стандарта;  $R$  – разность между максимальным и минимальным значениями; (диапазон рассеяния);  $VER$  – вертикальное увеличение;  $HOR$  – горизонтальное увеличение;  $LT$  – общая длина трассы сканирования;  $GS$  – элементарная (базовая) длина сканирования.

Примечание [V224]: Стр: 59

Примечание [V225]: Стр: 59  
[a№56] Попов С.А., Малевский Н.П., Терещенко Л.М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. - М.: Машиностроение, 1977. - 263 с. {Book: Date 29/01/02 Time 22:28:46}

Примечание [V226]: Стр: 59  
[a№3006] Грабченко А. И. Научные основы алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов: Диссертация в форме научного доклада докт. техн. наук: 05.03.01. - Харьков, 1995. - 59 с. {Book: Date 03/09/02 Time 21:16:15}



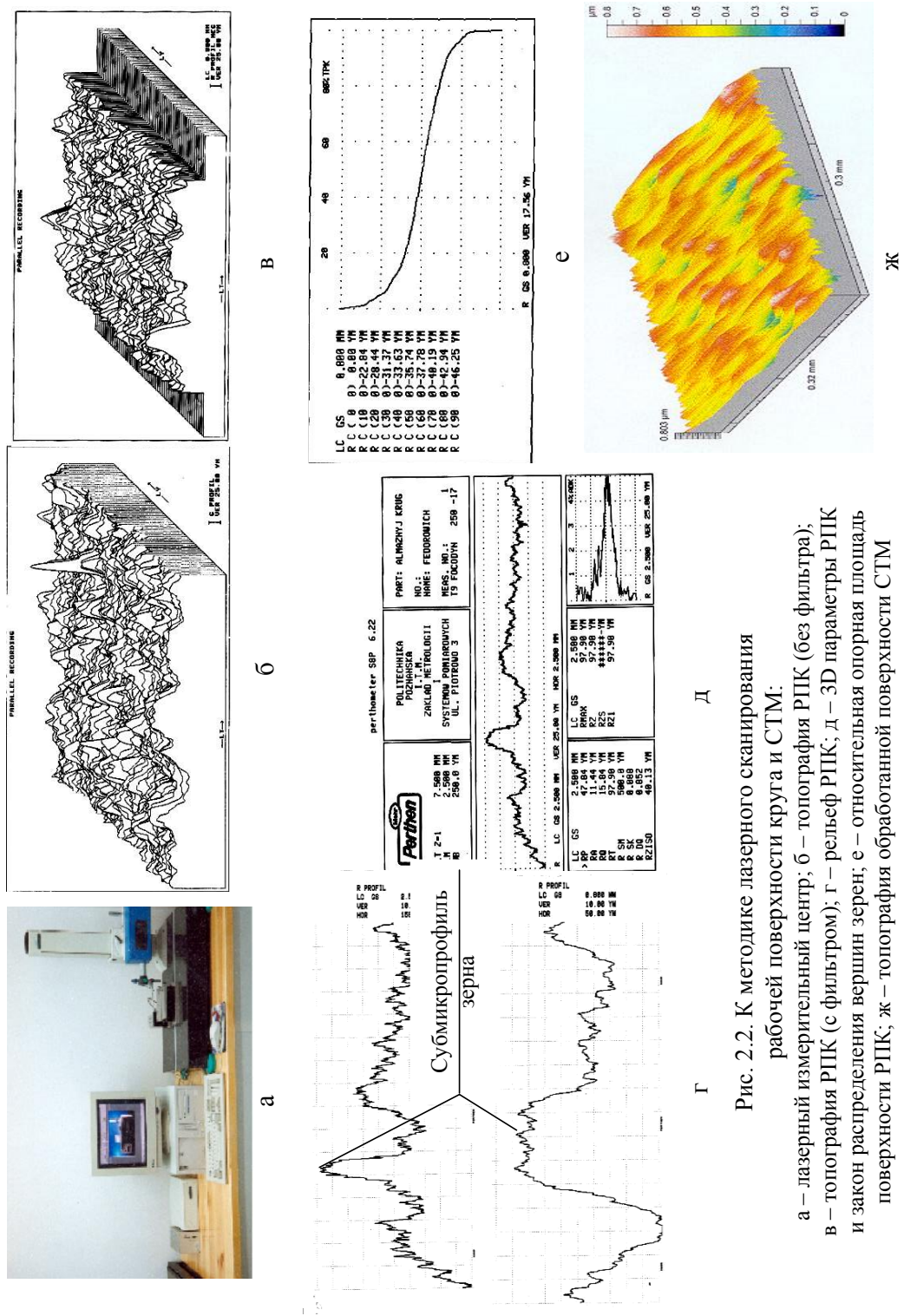


Рис. 2.2. К методике лазерного сканирования рабочей поверхности круга и СТМ:  
а – лазерный измерительный центр; б – топография РПК (без фильтра);  
в – топография РПК (с фильтром); г – рельеф РПК; д – 3D параметры РПК  
и закон распределения вершин зерен; е – относительная опорная площадь  
поверхности РПК; ж – топография обработанной поверхности СТМ



Лазерный измерительный центр позволяет получать визуальное изображение 3D топографии как непосредственно РПК (позитив), так и его отпечатка (негатива), обозначаемой на рис. 2.2 б, в символом NEG. Топография РПК может быть получена как с учетом волнистости поверхности (см. рис. 2.2 б), так и без, т.е. в отфильтрованном виде (см. рис. 2.2 в).

Анализ поверхности реплики (NEG) РПК показывает, что основная масса зерен выпадает из связки только в первые секунды шлифования, т.е. параметры негатива РПК в выступающей части практически одинаковы для 3 секунд и 2 минут шлифования (см. рис. 2.3 и 2.4.).

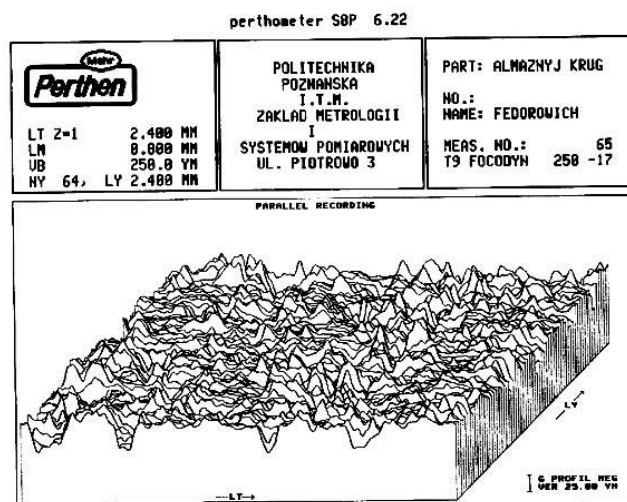


Рис. 2.3. Негатив 3D топографии рабочей поверхности алмазного круга после 10 секунд шлифования

Такой вывод важен для изучения характера износа рабочей поверхности круга, т. е. после 3 секунд шлифования с достаточной точностью можно считать, что основной износ зерен происходит за счет их хрупкого микроразрушения, а не выпадения из связки.

Применительно к процессу алмазного шлифования СТМ, когда практически отсутствует внедрение алмазных зерен и работают субмикроромки алмазных зерен, особый интерес представляют параметры микрорельефа отдельных алмазных зерен. При изучении 3D топографии РПК с малым шагом сканирования (см. рис. 2.2 г), в нашем случае равном 2.38 мкм, лазерный луч по каждому алмазному зерну размером 100 мкм проходил более 30 раз. Использование данной методики позволяет подтвердить эффективность предложенного в гл. 7

способа принудительного формирования на алмазных зернах режущего субмикрорельефа.

Особый интерес представляет изучение параметра относительной опорной площади поверхности ( $t_{ps}$ ), который в большой степени определяет величину фактической площади контакта в системе РПК–СТМ.

С учетом того, что установленная нами при 3D моделировании напряженно-деформированного состояния системы «СТМ–зерно–связка» величина упругого внедрения зерна в СТМ не превышает 0.5 – 1 мкм [187], величину  $t_{ps}$  будем определять на уровне 1 мкм от максимально выступающего зерна, т.е. на уровне  $P = 5 \%$  при  $h_p = 20$  мкм.

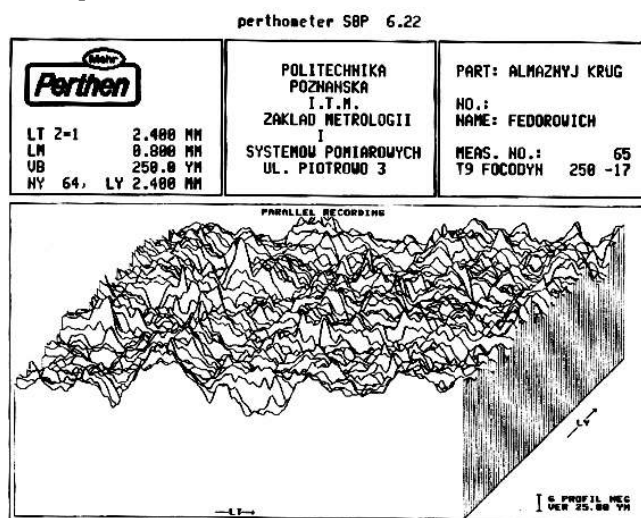


Рис. 2.4. Негатив 3D топографии рабочей поверхности алмазного круга после 2 минут шлифования

Методика лазерного сканирования позволяет в 3D варианте в компьютерном режиме определять величину  $t_{ps}$  как на макроуровне (РПК поверхности круга), так и на микроуровне – субмикрорельеф отдельных алмазных зерен. Величина «шероховатости» рабочей поверхности отдельных алмазных зерен является важным параметром при определении фактической площади контакта в системе «СТМ – зерно», который сложно получить другими способами. Величина относительной опорной площади профиля РПК на уровне 0 – 1 мкм (субмикрорельеф зерен) будет использована при определении величины фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ».

**Примечание [V227]:** Стр. 63 [а№3031] Федорович В.А. 3D моделирование напряженно-деформированного состояния системы "СТМ-зерно-связка" при алмазном шлифовании. // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. науч.-техн. сборник. - Харьков. - 2001. - Вып.60. -С. {Book: Date 29/01/02 Time 22:38:01}

Динамика изменения параметра  $t_{ps}$  на уровне  $P = 5 \%$ , что адекватно фактической площади контакта в системе «СТМ–зерно» свидетельствует, что у вновь вскрытого электрохимическим методом круга (рис. 2.5)  $t_{ps}$  возрастает медленно по глубине рельефа РПК, что свидетельствует о высокой остроте зерен, а у изношенного круга  $t_{ps}$  резко возрастает из-за массового образования на зернах площадок износа (рис. 2.6). Анализ динамики изменения параметра  $t_{ps}$  по глубине профиля одного и того же круга, но работающего в различных условиях, позволяет судить об изменении величины фактической площади контакта в системе «РПК – СТМ».

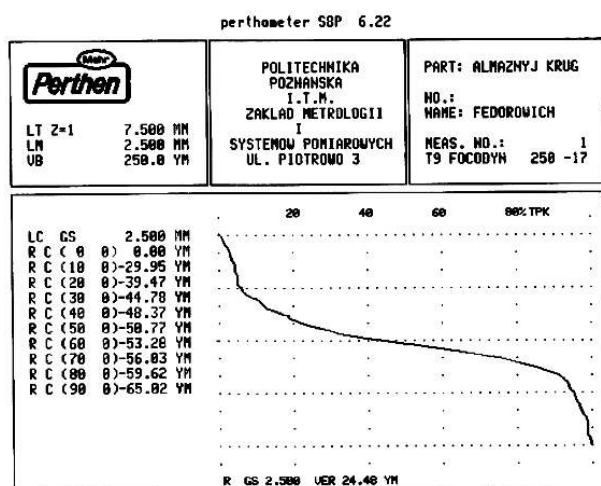


Рис. 2.5. Относительная опорная площадь топографии РПК после правки круга

Значительный практический и методический интерес представляет возможность фильтрации, которой обладает лазерный сканирующий измерительный центр. Она позволяет отделить волнистость макропрофиля РПК от рельефа алмазных зерен над уровнем связки. Такая методика особенно важна при анализе роли процесса управления продольным и поперечным профилем РПК [36].

Существенным достоинством данной методики является компьютерная обработка результатов сканирования и построения законов распределения высоты зерен над уровнем связки (см. рис. 2.2 д) и их изменения в процессе шлифования. Таким образом, методика лазерного сканирования рабочей поверхности круга позволяет быстро и достоверно определять законы распределения алмазных зерен над уровнем связки, которой занимались многие исследователи [9, 154, 182].

**Примечание [V228]:** Стр: 64  
[a№3006] Грабченко А. И. Научные основы алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов: Диссертация в форме научного доклада докт. техн. наук: 05.03.01. - Харьков, 1995. - 59 с. {Book: Date 03/09/02 Time 21:16:15}

**Примечание [V229]:** Стр: 64  
[a№5] Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов. - К.: Наукова думка, 1978. - 207 с. {Book: Date 03/09/02 Time 15:22:32}

**Примечание [V230]:** Стр: 64  
[a№325] Резников А.Н., Федосеев О.В., Щипанов В.В. Теоретико-вероятностное описание режущего аппарата шлифовальных инструментов, толщины среза и усилия резания // Физика и химия обработки материалов. - 1976. - № 4. - С. 93-102. {Book: Date 03/09/02 Time 15:24:03}

**Примечание [V231]:** Стр: 64  
[a№1052] Узунян М. Д. Теоретический анализ плотности распределения зерен на рабочей поверхности алмазного круга // Резание и инструмент. - Харьков. - 1980. Вып. 23. - С. 104-110. {Book: Date 03/09/02 Time 15:24:23}

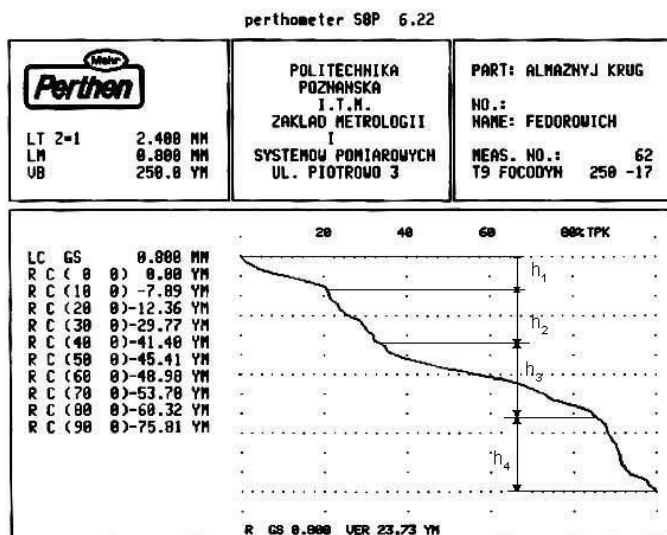


Рис. 2.6. Относительная опорная площадь топографии РПК после 2-х минут шлифования

С использованием этой же методики исследовались и параметры топографии обработанной поверхности СТМ, граней и режущей кромки резцов из СТМ и их зависимость от условий обработки (см. рис. 2.2 ж).

## 2.4. Исследование 3D напряженно-деформированного состояния (НДС) зоны шлифования

Если материал сохраняет свойство линейной упругости вплоть до разрушения, например, алмаз, за исключением небольшой окрестности вершины трещины, то учет влияния трещины нормального отрыва на прочность тела может быть осуществлен с позиций линейной механики разрушения. Однако, определение параметров разрушения представляет собой сложную физическую и математическую задачу, аналитические решения которой получены только для частных случаев. Для решения задач со сложной геометрией и условиями нагружения обычно применяют численные методы, среди которых наибольшее распространение получил метод конечных элементов (МКЭ).

В настоящее время разработаны и эффективно используются целый ряд пакетов программ по методу конечных элементов, которые обладают большими

возможностями. Из зарубежных наиболее распространенными являются пакеты типа «Cosmos», «Ansys» и «Nostran». В данной работе были использованы пакеты, аналогичные типам «Cosmos» и «Ansys». Пакет позволяет в трехмерном измерении (3D модель) рассчитывать поля приведенных и главных напряжений, энергию и плотность энергии деформации, температурные поля и поля термосиловых напряжений, а также частоту собственных колебаний алмазных зерен. Окно программы представлено на рис. 2.7. Пример расчетов приведенных напряжений в элементах 3D системы «СТМ–зерно–связка» приведен на рис. 2.8 и в приложении А. На шкалах результатов расчета условно обозначены: Von Mises – приведенные напряжения, МПа; ENERGY – энергия деформации, SED – плотность энергии деформации; ESTRN – деформация; Princ\_1(2,3) – главные напряжения.

Важным достоинством метода является возможность одновременного изучения напряженно-деформированного состояния (НДС) во всех элементах единой 3D системы «СТМ–зерно–связка» с учетом их взаимовлияния при различных физико-механических свойствах элементов системы и условиях ее нагружения. Вклад каждого из рассмотренных факторов в общий съем шлифуемого СТМ и другие выходные показатели определяются тем, как функционирует вся система «СТМ–зерно–связка». Дифференцированный подход, применявшийся другими исследователями [111, 153], к изучению явлений, протекающих в зоне шлифования, нивелирует выявление роли взаимовлияния элементов, в частности связки, влияния ее свойств на напряжения в контакте СТМ–зерно.

При исследовании взаимодействия зерна с поликристаллом рассматриваются модели, в которых связка, зерно и поликристалл полагаются упругими сплошными телами. Поскольку наиболее распространенной формой кристаллитов (монокристаллов) алмаза считается октаэдр, форму 3D конечных элементов в МКЭ принимали близкой к нему. Такой подход обоснован еще и тем, что при разрушении алмаза продукты разрушения (частицы) имеют именно форму октаэдра [60].

Связка и поликристалл при моделировании представлялись в виде призматических фрагментов с размерами соответственно 1×1×3 мм и 1×1×2 мм, а зерно – в виде октаэдра с размерами 200×140×140 мкм, что позволяет достаточно точно моделировать деформирование фрагментов модели с учетом удаленности зон краевых эффектов. Расчетная схема модели приведена на рис. 2.8 а.

**Примечание [V232]:** Стр: 66  
[a№44] Мишнаевский Л.Л. Износ шлифовальных кругов. - К.: Наукова думка, 1982. - 192 с. {Book: Date 13/08/02 Time 15:31:02}

**Примечание [V233]:** Стр: 66  
[a№3061] Епифанов В.И., Песина А.Я., Зыков Л.В. Технология обработки алмазов в бриллианты. - М.: Высш. шк., 1984. - 319 с. {Book: Date 29/08/02 Time 16:26:18}

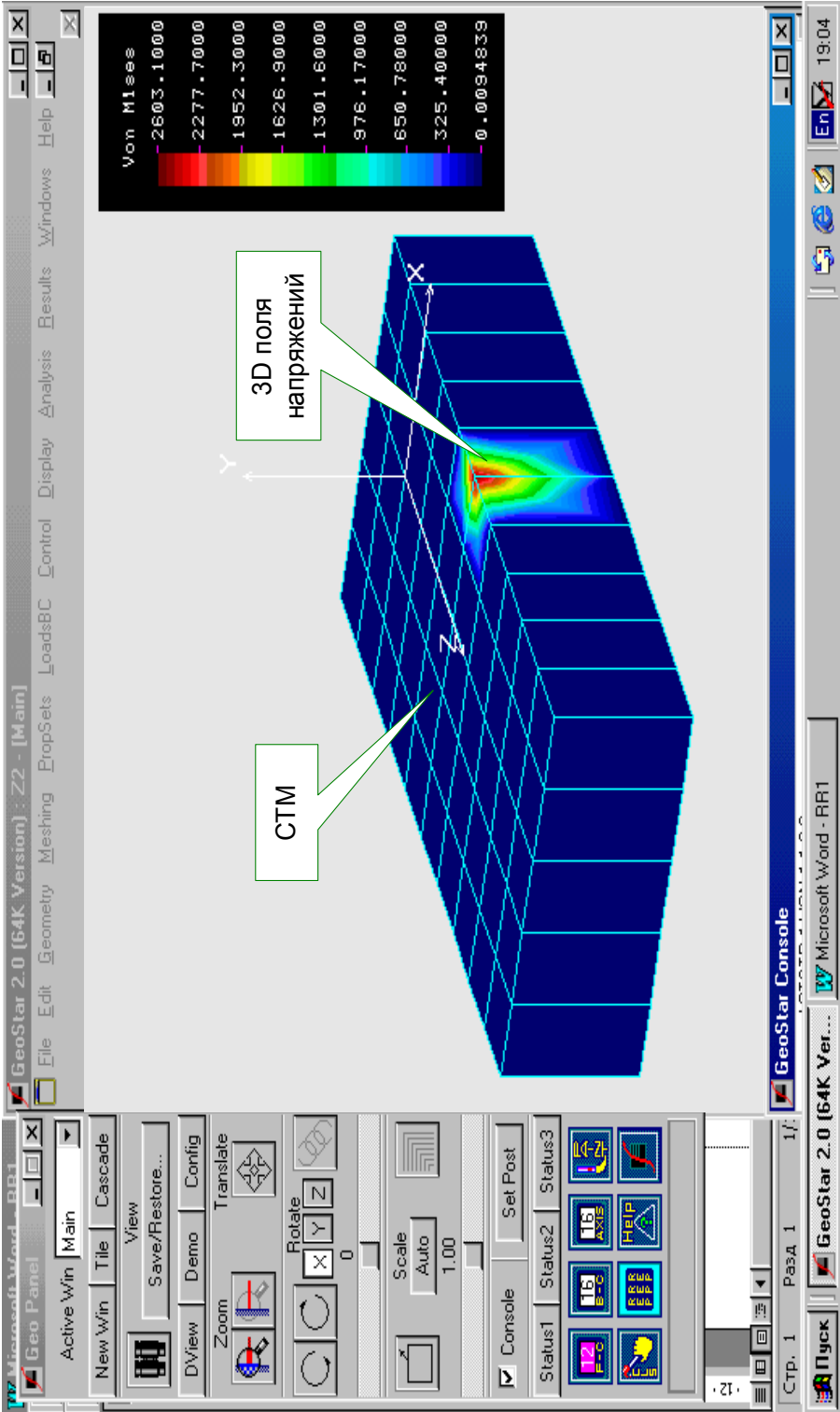


Рис.2.7. Окно программы для расчета по методу конечных элементов

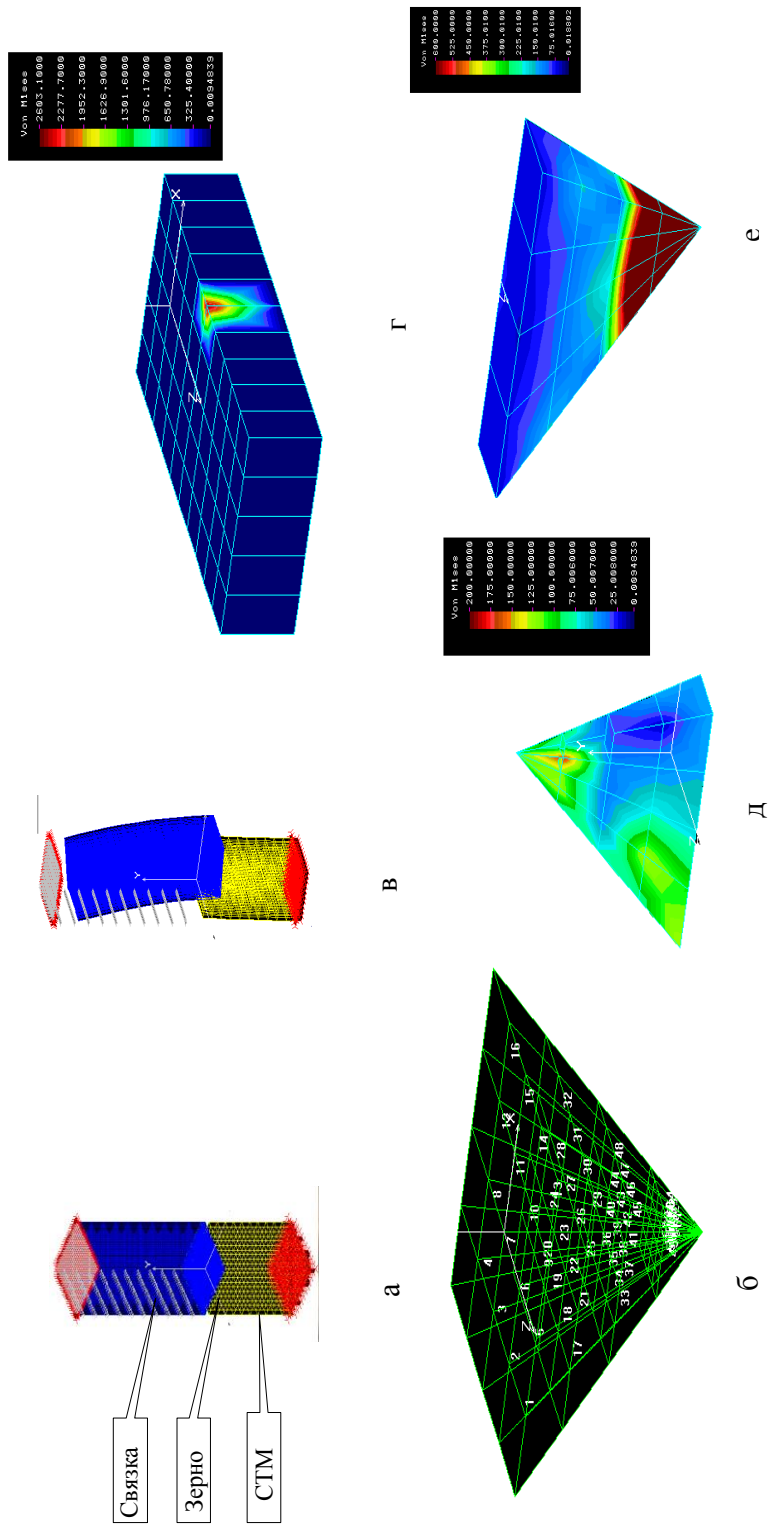


Рис. 2.8. 3D модель напряженно-деформированного состояния системы «СТМ-зерно-связка»:  
а – конечноэлементная сетка системы «СТМ-зерно-связка»; б – конечно-элементная сетка зерна; в – деформации в системе;  
г – напряжения в СТМ; д, е – напряжения в зерне

В качестве возможных вариантов ориентации зерна относительно поликристалла рассматривались три: контакт зерна с поликристаллом по вершине зерна (точечный контакт), ребру (линейный контакт) и плоскости (плоский контакт-имитация площадки износа на зерне). При изучении совместной работы зерен рассматривались различные соотношения этих вариантов.

Конечноэлементный анализ проводился с применением восьмиузловых элементов SOLID.

Нагружение модели производилось по двум вариантам: 1) заданием перемещения  $U_y$  верхней плоскости связки (кинематическое воздействие – имитация поперечной подачи  $S_{\text{поп}}$ ); 2) приложением давления к верхней плоскости связки (силовое воздействие нормальной и тангенциальной составляющих силы резания – имитация упругой схемы шлифования). Достоинством такого подхода является возможность изучения 3D НДС при упругой и жесткой схеме шлифования и сравнения результатов исследований.

В качестве характерной реакции модели на нагружение были приняты: 1) перемещение среднего узла верхней поверхности связки (величина поперечной подачи)  $-U_y^{\text{CB}}$ ; 2) перемещение верхнего узла зерна (заглубление зерна в связку)  $-U_y^3$ ; 3) перемещение узла контакта зерна с поликристаллом (упругое заглубление зерна в СТМ)  $-U_y^{\text{ПК}}$ ; 4) приведенные напряжения (по Мизесу) в верхнем узле контакта зерна со связкой  $-\sigma_{\text{CB}}$ ; 5) приведенные напряжения в узле контакта зерна с поликристаллом  $-\sigma_{\text{ПК}}$ .

Трехмерное изучение модели (по сравнению с плоской задачей) позволяет в нашем случае вскрыть существенную разницу в НДС при контакте зерна с СТМ по ребру и вершиной (в плоской задаче величина НДС будет одинакова). Сравнительный анализ результатов расчета НДС системы для плоской и трехмерной задачи показал, что они могут отличаться на 20–150 %. Естественно, что наиболее реалистичные результаты получаются при 3D моделировании.

Поскольку в реальном процессе алмазного шлифования рассматриваемая техническая система нагружена не только силовыми, но и температурными воздействиями, определяли величину главных и приведенных напряжений, а также величину деформаций, энергии и плотности энергии деформации в каждом элементе системы «СТМ–зерно–связка» от силового, температурного и суммарного – термосилового нагружения. Для этого кроме величины нормаль-



ного давления или поперечной подачи задавалась и величина контактной температуры в зоне шлифования, и температура подаваемой в зону шлифования СОТС. При исследовании причин образования дефектного слоя (брака при шлифовании СТМ) поликристалл моделировался в виде совокупности отдельных кристаллитов и прослоек металлофазы. Пример результатов расчета термодинамических полей плотности энергии деформации в системе приведен на рис. 2.9.

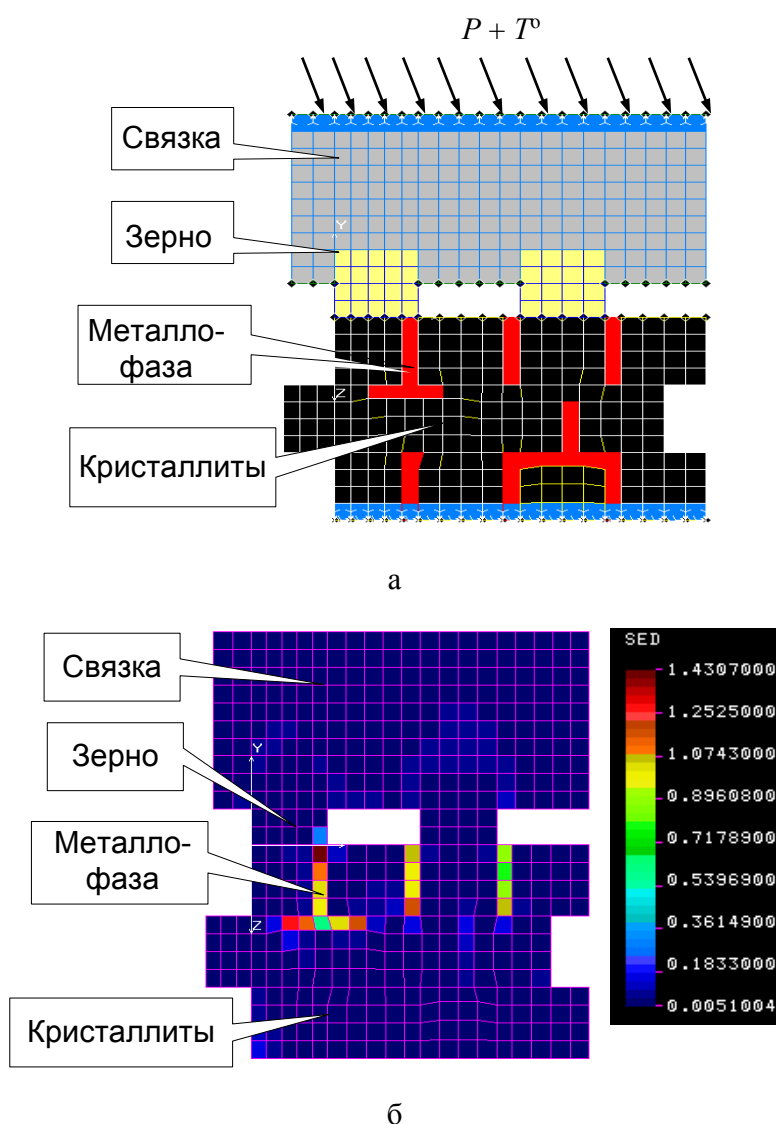


Рис. 2.9. Расчетная схема (а) и результаты расчета энергии деформации в элементах системы «связка– зерно–металлофаза–кристаллиты СТМ»

Для определения объемов разрушенных СТМ и алмазных зерен использовали как силовые (приведенные напряжения превышают предел прочности СТМ на растяжение), так и энергетические (энергия деформации в элементе превышает предельное значение) критерии разрушения. Пакет позволяет определять величину энергии деформации и плотность энергии в каждом элементе системы. При этом можно определить объем элементов с закритическими значениями приведенных напряжений или закритической энергией деформации. Эти возможности пакета использованы нами при теоретическом определении величины удельного износа в теоретическом модуле экспертной системы процесса алмазного шлифования СТМ (см. гл. 8).

С целью получения максимально достоверных результатов расчета объемов разрушенных СТМ и алмазных зерен конечноэлементная сетка элементов системы «СТМ–зерно–связка» сгущалась по мере приближения к зоне контакта (к зоне разрушения) до размеров объема элемента, не превышающего  $10^{-4}$  мкм<sup>3</sup>, что значительно меньше реально разрушаемого объема при одноактном воздействии алмазным зерном в процессе шлифования.

Возможности пакета по определению частоты собственных колебаний алмазных зерен в связке использованы нами для учета анизотропии физико-механических свойств СТМ при назначении оптимальных режимов шлифования (см. п. 7.6).

## 2.5. Теоретическое и экспериментальное определение динамической прочности алмазных зерен в круге

Статическая и динамическая прочность алмазных зерен наряду с твердостью является одним из важнейших их физико-механических свойств [97].

Классическим методом определения статической прочности является разрушение единичных зерен при одноосном сжатии между двумя корундовыми пластинами плавно возрастающей нагрузкой [15]. Возможно также «раздавливание» единичного зерна между корундовой пластиной и пластинкой из материала связки круга [26]. Недостатком данного метода является статический характер разрушения, что не соответствует характеру нагружения алмазных зерен в реальном процессе шлифования. Кроме этого в процессе испытания происходит объемное макроразрушение зерен, а в процессе шлифования преимущественно выкрашиваются режущие кромки алмазных зерен.

**Примечание [V234]:** Стр: 71  
[a№3085] Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В. Износ алмазов и алмазных кругов. - М.: Машиностроение, 1967. - 112 с. {Book: Date 30/08/02 Time 07:03:09}

**Примечание [V235]:** Стр: 71  
[a№280] Бокучава Г.В. Трибология процесса шлифования. - Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1984. - 238 с. {Book: Date 06/02/02 Time 21:14:12}

**Примечание [V236]:** Стр: 71  
[a№3166] Власов В.И. Оптимальная твердость связки алмазных шлифовальных кругов. // Алмазы и сверхтвердые материалы, 1976 вып. №2, с.15-20. {Book: Date 28/02/02 Time 22:01:35}

К динамическим методам определения прочности алмазных зерен относится так называемый вибрационный метод, используемый для испытания фирмой «Де-Бирс», заключающийся в приложении к определенной массе зерен вибрационной нагрузки, а также испытание единичных зерен при заданной ударной нагрузке, применяемое фирмой «Комацу» [15].

Следует подчеркнуть существенное несоответствие результатов испытаний по этим двум методам. Так, статистическая прочность алмазных зерен с ростом их зернистости растет, а динамическая – падает (рис. 2.10 а).

К тому же, описанные выше динамические методы далеки от реальных условий шлифования. Нами предложен способ определения динамической прочности алмазных зерен непосредственно в шлифовальном круге. Принципиальная схема реализации предложенного способа представлена на рис. 2.10 б. Способ основан на ультразвуковом воздействии инструментом-ударником (рис. 2.10 в) на рабочую поверхность алмазного круга. В качестве критерия динамической прочности алмазных зерен принимается число циклов воздействия на них до разрушения (см. рис. 2.10 а).

В качестве рабочего инструмента-ударника используется прямоугольная пластина с закрепленными в ней вставками с алмазосодержащим слоем на прочных металлических связках с прочными (АС160Т) и мелкими алмазными зернами (см. рис. 2.10 в).

Частота колебаний  $f$ , согласованная со скоростью вращения круга  $V_{кр}$ , и амплитуда колебаний  $a$  могут быть определены теоретически (см. гл. 8) или подбираются экспериментально. Использование образцов с различными марками алмазных зерен, а также проведение испытаний на кругах с различными металлическими связками максимально приближают предложенный метод определения динамической прочности алмазных зерен к реальному процессу шлифования различных СТМ.

Процесс микроразрушения вершин зерен (в зоне контакта) изучали и на единичном алмазном зерне, вмонтированном в рабочую поверхность круга (рис. 2.10 г). Проводить испытания алмазных зерен на динамическую прочность целесообразно после образования на них площадок износа, например, после 20 – 30 сек шлифования СТМ на основе алмаза. Процесс изучения может осуществляться как при вращающемся круге, так и на неподвижном. Наблюдение за процессом разрушения зерен осуществляется в микроскопическую трубку Мир-2 или по методике оценки уровня приспособляемости, изложенной в п. 2.8.

Примечание [V237]: Стр: 72  
[a№280] Бокучава Г.В. Трибология процесса шлифования. - Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1984. - 238 с. {Book: Date 06/02/02 Time 21:14:12}

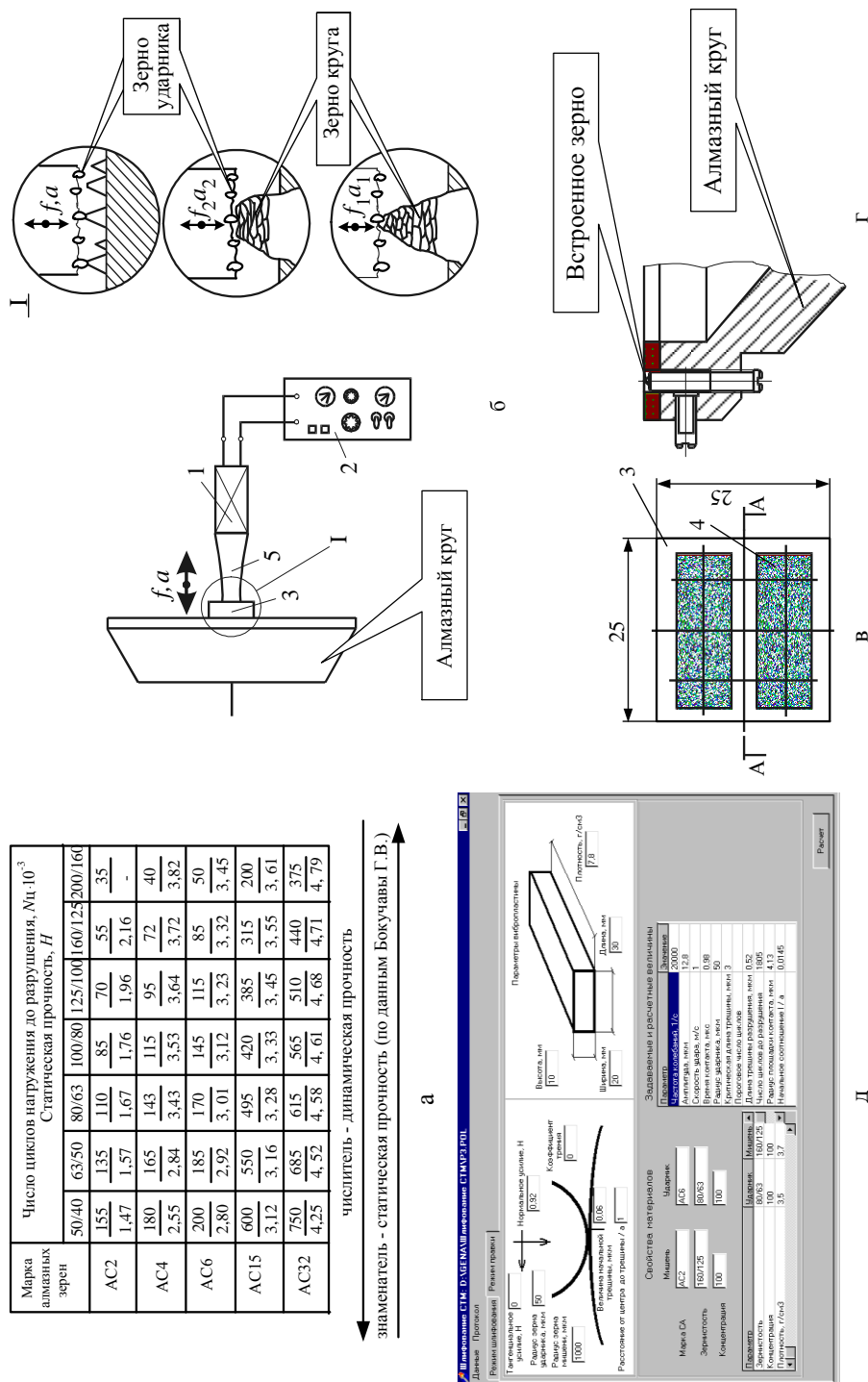


Рис. 2.10. Методика определения динамической прочности алмазных зерен в круге: а – результаты расчета; б – схема реализации метода; в – инструмент-ударник; г – единичное зерно; д – окно программы расчета.  
1 – магнитострикционный вибратор; 2 – ультразвуковой генератор; 3 – рабочий инструмент;  
4 – «таблетка» из СКМ; 5 – концентратор

Результаты исследования по определению динамической прочности различных марок алмазных зерен и зернистостей приведены на рис. 2.10 а. Установлено, что динамическая прочность алмазных зерен возрастает при уменьшении зернистости и повышении их качества.

Принципиальной особенностью предложенного метода является то, что определяется не динамическая прочность в макрообъеме (т. е. всего зерна), как это делается в ранее известных способах «раздавливания» зерен или разрушения их в центрифугах. В нашем случае определяется динамическая прочность алмазных зерен (или обрабатываемого СТМ) только в приповерхностном слое, глубиной не более длины критической трещины разрушения ( $l_{кр}$ ). Такой подход полностью соответствует характеру взаимного разрушения алмазных зерен и обрабатываемого СТМ при шлифовании.

При определении динамической прочности алмазных зерен в круге важную роль играет модуль упругости металлической связки. Для каждой конкретной связки этот параметр будет различен. В этом случае жесткость связки будет входить в комплексный показатель динамической прочности зерен, что выгодно отличает предложенный способ от известных. Определенная таким образом динамическая прочность алмазных зерен является комплексным показателем качества алмазных кругов на металлических связках с учетом свойств последних.

Динамическая прочность алмазных зерен марки АС6 в кругах на различных металлических связках представлена в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Влияние модуля упругости связки на динамическую прочность зерен

Динамическая прочность	Марка металлической связки				
	M1-05 (MO13)	M1-01 (MB1)	M2-01 (M1)	M6-14 (МЖ)	M6-16 (M-13)
	Модуль упругости связки, ГПа				
	69.4	93	105	162	193.7
$N_{цикл}$	<u>7500</u>	<u>6300</u>	<u>5500</u>	<u>3800</u>	<u>3100</u>
	7800	6700	6000	4100	3800

Примечание. В числителе – экспериментальные результаты, в знаменателе – результаты расчета по гл. 5.

Предложенная методика определения динамической прочности алмазных зерен позволила эффективно использовать результаты ее применения в разработанных нами способах шлифования различных СТМ с комбинированным управлением процессом приспособляемости [188].

С использованием теории механики контактного разрушения разработана теоретическая модель определения динамической прочности алмазных зерен (см. гл. 8). Окно программы расчета динамической прочности алмазных зерен представлено на рис. 2.10 д, а результаты расчета на рис. 2.10 а.

Расчетный модуль экспертной системы (см. гл. 7) позволяет определить динамическую прочность алмазных зерен различных марок, количественно оцениваемую числом циклов нагружения до их разрушения в зависимости от параметров ультразвукового воздействия  $f$  и  $a$ , состояния поверхности алмазных зерен  $l_0$ , их геометрии и других параметров.

Теоретические расчеты по данной модели довольно хорошо сходятся с экспериментальными результатами определения динамической прочности различных марок алмазных зерен (см. рис. 2.10 а).

Полученные экспериментально или рассчитанные по экспертной системе значения динамической прочности алмазных зерен различных марок использованы при определении оптимальных условий шлифования различных СТМ, а также при назначении режимов управления режущим рельефом кругов (см. гл. 7). Динамическая прочность алмазных зерен является основным показателем при разделении процесса шлифования СТМ на производительный и прецизионный. Если нагрузка на зерно в процессе шлифования больше его динамической прочности – процесс производительный, если меньше – прецизионный (доводочный).

Безусловно, предложенная методика не определяет динамическую прочность алмазных зерен в «чистом» виде, а исследуется комплекс (композиция) «зерно–связка», но в реальном процессе «работает» именно такая динамическая прочность и поэтому именно она представляет практический интерес. Предложенная методика определения динамической прочности алмазных зерен рекомендована для аттестации алмазных кругов.

**Примечание [V238]:** Стр: 75  
[a№3032] Федорович В.А. Способы шлифования с комбинированным управлением режущим рельефом кругов. Вестник ХГПУ, Харьков. вып.45, с.26-28. {Book: Date 06/02/02 Time 21:15:49}

## 2.6. Определение удельного износа и коэффициента использования потенциальных режущих свойств алмазных зерен

Традиционно используемое понятие удельного расхода алмазов связано с общим объемом алмазных зерен, затраченных на съем определенного объема обрабатываемого материала, т.е. он учитывает суммарный объем изношенных зерен и выпавших из связки. Такой показатель не дает ответа на вопрос, насколько эффективно используются потенциальные режущие свойства алмазных зерен, т.е. какая их часть изнашивается, а какая выпадает из связки. В. С. Пташников [143] предложил разделить этот удельный расход на две части – удельный износ  $q_{\text{и}}$  (фактическое соотношение объемов диспергированных зерен и СТМ) и неэффективный расход  $q_{\text{в}}$  (отношение объемов выпавших из связки круга зерен и снятого СТМ).

$$q = q_{\text{и}} + q_{\text{в}} \quad (2.1)$$

Отношение объемов диспергированных зерен  $V_{\text{д}}$  к объему всех израсходованных зерен  $V_{\text{з}}$  принято называть коэффициентом использования потенциальных режущих свойств алмазных зерен  $K_{\text{и}}$ :

$$K_{\text{и}} = \frac{V_{\text{д}}}{V_{\text{з}}} \quad (2.2)$$

Этот коэффициент является одним из главных показателей эффективности процесса алмазного шлифования. По данным Т. Н. Лоладзе и Г. В. Бокучава [97] при традиционных способах шлифования  $K_{\text{и}}$  не превышает 5 – 10 %. Исходя из вышесказанного, следует определение коэффициента использования потенциальных режущих свойств алмазных зерен и поиск путей его увеличения считать чрезвычайно важной задачей. Особенно это важно для процессов алмазного шлифования сверхтвердых материалов, когда контактируют практически равнотвердые алмазные зерна и СТМ. Для определения наиболее эффективных пар «марка зерна – марка СТМ» определяющим показателем является величина удельного износа, т.к. величина удельного расхода в большой степени определяется свойствами связки. При обработке этих материалов удельный расход достигает значительной величины. Например, при шлифовании АСПК зернами марки АС6 кругами на различных органических и металлических связках  $q$  может достигать соответственно 50–30 кар/карат, т.е. чтобы снять 1 карат

**Примечание [V239]:** Стр: 76  
[a№3080] Пташников В. С. Влияние механизма износа круга на удельный расход эльбора при шлифовании //Абразивы. - 1978.- Вып. 9.- С. 6-10. {Book: Date 16/04/02 Time 22:54:26}

**Примечание [V240]:** Стр: 76  
[a№3085] Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В. Износ алмазов и алмазных кругов. - М.: Машиностроение, 1967. - 112 с. {Book: Date 12/07/02 Time 09:38:19}



АСПК необходимо затратить 50–30 карат алмазных зерен. Очевидно, что себестоимость обработки в этом случае будет очень высока.

Поскольку производительное шлифование СТМ – это в основном процесс взаимного хрупкого микроразрушения элементов системы «СТМ – зерно», то удельный износ  $q_{\text{и}}$  определяется отношением объема разрушенных алмазных зерен  $V_1$  к объему снятого обрабатываемого материала  $V_2$ .

Методика определения  $K_{\text{и}}$  основана на особенностях шлифования СТМ кругами на металлических связках. Эта особенность заключается в том, что отсутствует внедрение алмазных зерен в обрабатываемый материал, износ рабочей поверхности вскрытого круга (например, электрохимическим способом) осуществляется в пределах одной высоты выступания зерен и при этом связка не изнашивается, т.к. до определенного периода не контактирует с обрабатываемым СТМ. Методика защищена а.с. 1404892.

Применение предложенной методики (см. гл. 6) позволило провести сравнительный анализ соотношений удельного расхода  $q$  и удельного износа  $q_{\text{и}}$ , определить оптимальное сочетание пары «марка СТМ – марка алмазного зерна» и коэффициент использования режущих свойств алмазных зерен.

Для проверки достоверности результатов применения описанной методики использовалась разработанная В. Л. Доброскоком [52] система 3D моделирования рабочей поверхности круга, а также методика экспериментального определения коэффициента использования потенциальных режущих свойств алмазных зерен. Для такой оценки изучался шлам, извлекаемый из СОЖ, содержащей остатки выпавших из связки зерен [146]. Для отделения их от «стружек» обрабатываемого СТМ использовали металлизированные зерна, отходы которых извлекали из СОЖ с помощью магнита. Зная расход алмазов  $P_1$  (по весу за исследуемый период шлифования) и сравнивая его с весом шлама  $P_2$ , можно определить коэффициент эффективности использования зерен. Вес шлама – неэффективно использованная часть зерен  $P_2$ .

$$K_{\text{и}} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \quad (2.3)$$

В гл. 6 разработана и применена методика теоретического определения объемов разрушенных и выпавших из связки зерен, а также объемов разрушенного СТМ. На основании этого стало возможным теоретически оценить величину удельного расхода и удельного износа алмазных зерен.

**Примечание [V241]:** Стр: 77  
[a№1021] Доброскок В.Л. Наукові основи формоутворення робочої поверхні кругів на токопровідних зв'язках у процесі шліфування: Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Нац. тех. ун-т "ХПІ". -Х., 2001. - 33 с. {Book: Date 13/08/02 Time 14:07:34}

**Примечание [V242]:** Стр: 77  
[a№3077] Пташников В.С. Относительное диспергирование активных зерен эльбора при шлифовании как характеристика механизма износа круга // Абразивы. - 1976.- Вып. 12. - С. 1-7. {Book: Date 13/08/02 Time 14:05:10}

## 2.7. Методика определения фактической площади контакта в системе «СТМ–зерно–связка»

Характер и интенсивность взаимного микроразрушения элементов системы «СТМ–зерно–связка» в большой степени определяется величиной фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ». Наиболее изучено контактирование шероховатых поверхностей с учетом вероятности встречи выступов, моделированных в виде стержней, сфер и эллипсоидов в работах Н. Б. Демкина, И. В. Крагельского, Э. В. Рыжова, И. Х. Чеповецкого [49, 79, 157].

Принципиальным отличием процесса взаимодействия системы «РПК – СТМ» от рассматриваемого при трении и износе является то, что контактируют принципиально различные по топографии поверхности. Одна из них РПК – дискретная, другая СТМ – квазисплошная. Контактуют практически идеально жесткие алмазные материалы, причем дискретную поверхность РПК формируют алмазные зерна, закрепленные в относительно пластичном материале – связке.

Выполненные опыты показали, что с увеличением нагрузки размер пятен упругого контакта растет незначительно, а фактическая площадь контакта повышается в основном за счет увеличения их количества (упругое вдавливание зерен в связку). В работе рассматривались следующие площади контакта в системе РПК – СТМ:

1) номинальная  $A_d$ , определяемая геометрическими размерами контактирующих поверхностей; 2) контурная  $A_c$ , обусловленная площадками контакта, возникающими из-за макрогеометрических отклонений; 3) фактическая (физическая)  $A_r$ , представляющая собой сумму фактических участков соприкосновения инструмента и детали, через которые передается давление.

Поскольку определяющую роль играет не общая фактическая площадь контакта  $A_r$ , а удельная, приходящаяся на каждый отдельный контакт, т.е. на макроуровне это  $A_{r\text{уд}} = \frac{A_r}{n}$ , где  $n$  – число зерен в контакте. Очевидно, что чем мельче зерна, тем меньше величина пятен контакта, тем больше напряжения в контакте.

**Примечание [V243]:** Стр: 78  
[a№3041] Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. - М.: Наука, 1970. - 227 с. {Book: Date 29/07/02 Time 20:47:55}

**Примечание [V244]:** Стр: 78  
[a№398] Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Рыжов Э.В., Сагарда А.А., Ильинский В.Б., Чеповецкий И.Х. - К.: Наук. думка, 1979. - 244 с. {Book: Date 29/07/02 Time 20:46:57}

**Примечание [V245]:** Стр: 78  
[a№547] Рыжов Э.В., Колесников Ю.В., Сулов А.Г. Контактное взаимодействие твердых тел при статических и динамических нагрузках. - Киев: Наук. думка, 1982. - 168 с. {Book: Date 29/07/02 Time 20:45:26}

На микроуровне  $A'_{руд} = \frac{A_r}{nn_1}$ , где  $n_1$  – число субмикроромок на зерне, находящемся в контакте.

Исходной для расчета фактической площади контакта является формула определения среднего давления при упругой деформации сферических выступов по Герцу [204]:

$$\frac{q}{IP^{1/2}} = \frac{0.43H_{\max}E^{1/2}}{IP^{1/2}}, \quad (2.4)$$

где  $E$  – относительное сближение контактирующих поверхностей;

$I$  – упругая постоянная контакта;

$P$  – приведенный радиус контактирующих сфер;

$H_{\max}$  – расстояние между линией выступов и линией впадин профиля.

При моделировании процесса контактирования в системе «РПК–СТМ» предполагается, что алмазные зерна могут упруго вдавливаются в связку при контактировании с микронеровностями СТМ.

Фактическая площадь контакта по Н. Б. Демкину [49] при упругой деформации микровыступов рассчитывается по формуле:

$$A_r = A_c \left\{ \frac{2.35b^{\frac{1}{2\delta}} r^{\frac{1}{2}} (1-\mu^2) N}{2^{\frac{1}{2\delta}} K_2 h_{\max}^2 E A_c} \right\}^{\frac{2\delta}{2\delta+1}}, \quad (2.5)$$

где  $K_2$  – постоянная интегрирования, величина, которая зависит от численного значения  $\delta$ ;

$N$  – нормальная нагрузка, Н;

$\mu$  – коэффициент Пуассона связки;

$E$  – модуль упругости связки, ГПа;

$r$  – радиус кривизны вершин зерен, мкм;

$h_{\max}$  – максимальная высота выступания зерен из связки;

$b$  и  $\delta$  – параметры опорной кривой рельефа РПК.

Под действием усилия прижима поверхности инструмента и детали сближаются. Сближение может в большой степени не соответствовать глубине упругого внедрения алмазов в обрабатываемый СТМ, т.к. при контактном вза-

**Примечание [V246]:** Стр: 79  
[a№3193] Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. - М.: Наука, 1974. - 640 с. {Book: Date 13/08/02 Time 14:09:04}

**Примечание [V247]:** Стр: 79  
[a№3041] Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. - М.: Наука, 1970. - 227 с. {Book: Date 29/07/02 Time 20:47:55}

имодействии они перемещаются в связке, а величина и характер этого перемещения изменяются в широком диапазоне в зависимости от физико-механических свойств связки.

По данным Н.Б. Демкина увеличение фактической площади контакта с ростом нагрузки осуществляется за счет «смятия» микронеровностей и поэтому в зависимости (2.5) учитывается модуль упругости контактирующих материалов  $E$ . Поскольку в нашем случае «смятием» микрогребешков можно пренебречь, а увеличение фактической площади контакта с ростом нагрузки будет происходить в основном за счет заглубления зерен в связку, с определенными допущениями в зависимостях Н. Б. Демкина использовали не модуль упругости контактирующих материалов (зерна и СТМ), а модуль упругости металлической связки.

Применительно к определению фактической площади контакта способ лазерного сканирования с компьютерной обработкой результатов измерения (см. п. 2.2) эффективен тем, что позволяет оценивать параметр  $t_{ps}$  – относительную опорную площадь на любом уровне высоты рельефа, т. е. при различных степенях приспособляемости системы «РПК–СТМ». Учитывая возможности данной методики отфильтровывать макрорельеф, например, волнистость, полученная величина  $t_{ps}$  на уровне 0 – 1 мкм (упругое вдавливание зерен в связку) является адекватной фактической площади контакта при допущении, что поверхность СТМ идеально гладкая. Аналогичным образом, получив компьютерную зависимость относительной опорной площади поверхности СТМ, можно по этим зависимостям прогнозировать и определять величину фактической площади контакта при любой степени приспособленности в системе «РПК–СТМ». Еще одно существенное достоинство метода лазерного сканирования – возможность количественно оценивать параметры микрорельефа отдельных алмазных зерен, которые используют в формулах Н. Б. Демкина и И. В. Крагельского при определении фактической площади на микроуровне.

Экспериментальное определение величины фактической площади контакта РПК с обрабатываемым СТМ проводилось также по отпечаткам на фольге, сдавливаемой с реально используемым при шлифовании нормальным давлением усилием  $P_n$  между кругом и обрабатываемым СТМ.

## 2.8. Разработка методики оценки степени приспособляемости при шлифовании

Методика основана на использовании склонности алмаза к электризации его поверхности при трении пары «алмаз–алмаз» [41, 84, 185].

Как известно [84], распиливание кристаллов алмаза сопровождается интенсивной статической электризацией. На этом принципе основано определение эффективности резки природных алмазов [59]. Величина тока электризации достигает нескольких сот nanoамперов и выбор его в качестве управляющего сигнала для включения цепи управления РПК обусловлен тем, что его проще регистрировать, чем, например, электронную или фотоэмиссию. Известно, что по мере износа алмазного круга на зернах образуются площадки износа, и процесс трансформируется в трение износостойкой пары «алмаз – алмаз» или «алмаз – связка» [32]. По мере увеличения площадок износа растет и ток электризации. На использовании эффекта электризации трущихся алмазных поверхностей разработана оригинальная методика определения степени топографической приспособляемости взаимодействующих поверхностей алмазного круга и обрабатываемого СТМ (рис. 2.11). График зависимости тока электризации от величины фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ» представлен на рис. 2.11 б.

Поскольку величина тока электризации мала, а наличие электролита вносит дополнительные сложности при регистрации сигнала, предложена специальная электрическая схема (см. рис. 2.11 а). Для снятия с площадок износа электрического тока малой величины используется электродинамический съемник 5 с вибропреобразователем 6, модуляция емкости которого осуществляется за счет изменения величины промежутка между площадками износа на алмазных зернах и пластиной конденсатора. Снятый сигнал малой величины усиливается электрометрическим усилителем 3 и синхронизируется с работой генератора 7 синхронным резистором 9. Усиленный сигнал подается на микроконтроллер 10, запрограммированный на включение через схему управления 11 любых параметров комбинированного управления РПК, т. е. может изменяться величина тока в цепи управления, скважность, частота и энергия импульсов, амплитуда и частота ультразвукового воздействия на зерна круга и т. д.

**Примечание [V248]:** Стр: 81  
[a№3125] Бочаров А.М., Сысоев П.В., Миронов В.С., Климович А.Ф. Контактная электризация в процессе распиливания кристаллов алмаза.-Алмазы и сверхтвердые материалы, 1983, вып. 3, с.1-2. {Book: Date 02/03/02 Time 14:32:19}

**Примечание [V249]:** Стр: 81  
[a№3188] Усманов А.И. Электростатические явления при трении и обработке материалов резанием: Автореф. дис. ...канд. техн. наук.-Ташкент, 1975.-280 с {Book: Date 02/03/02 Time 14:34:07}

**Примечание [V250]:** Стр: 81  
[a№3191] Федосеев Д.В., Внуков С.П., Буховец В.Л., Аникин Б.А. Графитизация алмазных порошков при высоких температурах // Докл. АН СССР.-1984.- Т.279, №1.-с.149-153. {Book: Date 02/03/02 Time 14:35:09}

**Примечание [V251]:** Стр: 81  
[a№3125] Бочаров А.М., Сысоев П.В., Миронов В.С., Климович А.Ф. Контактная электризация в процессе распиливания кристаллов алмаза.-Алмазы и сверхтвердые материалы, 1983, вып. 3, с.1-2. {Book: Date 02/03/02 Time 14:32:19}

**Примечание [V252]:** Стр: 81  
[a№3189] Епифанов В.И., Аптекман А.А. Принцип автоматизации процесса распиливания кристаллов алмаза.-Алмазы и сверхтвердые материалы, 1979, вып.9, с. 10-11. {Book: Date 02/03/02 Time 14:35:48}

**Примечание [V253]:** Стр: 81  
[a№3125] Бочаров А.М., Сысоев П.В., Миронов В.С., Климович А.Ф. Контактная электризация в процессе распиливания кристаллов алмаза // Алмазы и сверхтвердые материалы. - 1983. Вып. 3. - С. 1-2. {Book: Date 30/08/02 Time 07:18:26}

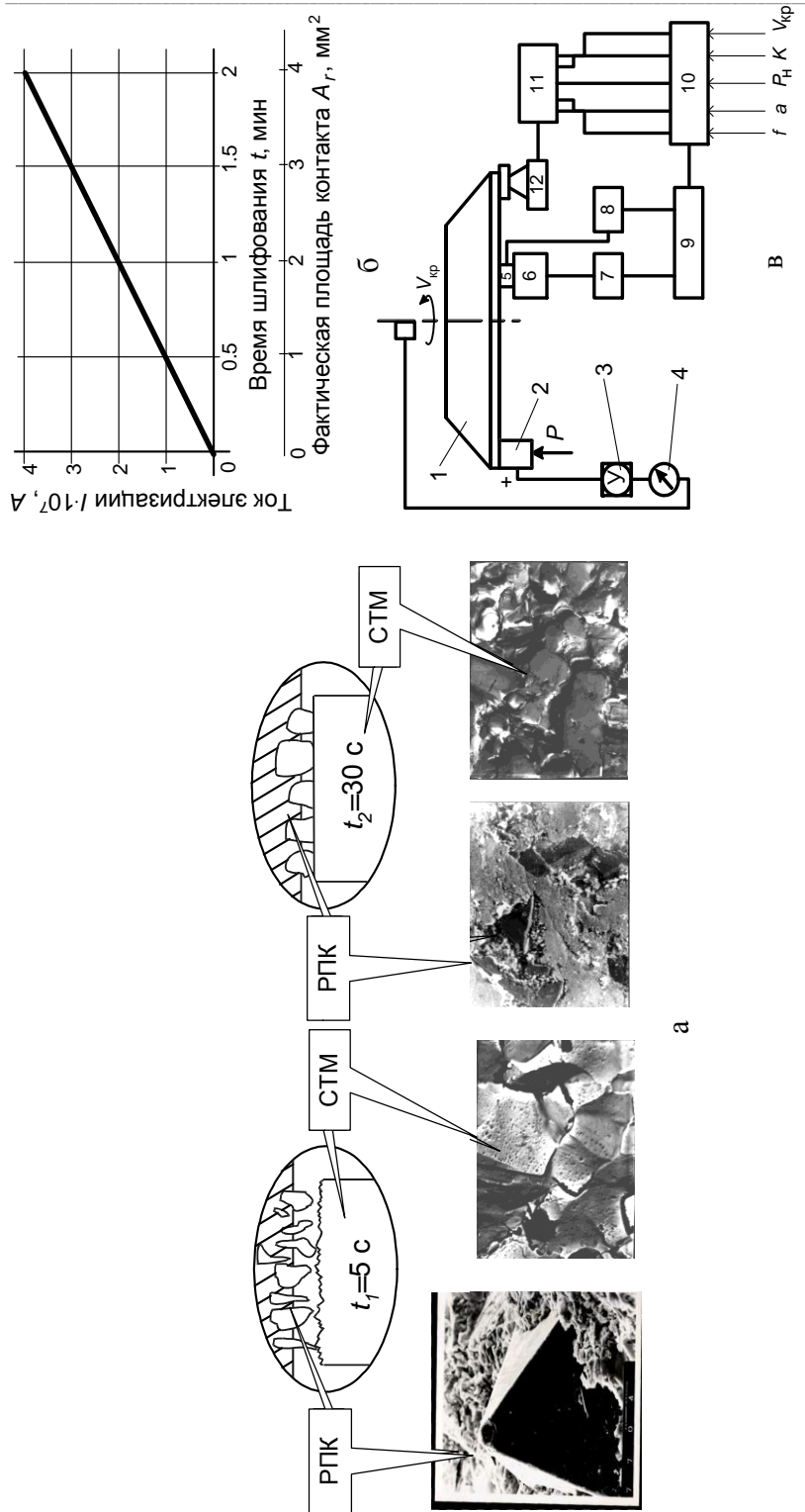


Рис. 2.11. Методика оценки уровня приспособляемости при шлифовании СТМ:

а – схема приспособляемости; б – зависимость тока электризации от фактической площади контакта в системе «РПК – СТМ».

1 – алмазный круг; 2 – шлифуемый образец; 3 – усилитель сигнала; 4 – микровольтаметр; 5 – съемник; 6 – вибропреобразователь; 7 – генератор; 8 – усилитель; 9 – синхронный резистор; 10 – микроконтроллер; 11 – схема управления; 12 – исполнительный механизм.

$f$  – частота ультразвуковых колебаний;  $a$  – амплитуда;  $P_n$  – нормальное давление;  $K$  – концентрация;  $V_{кр}$  – скорость круга

Величина снимаемого по разработанной схеме электрического потенциала зависит от количества и величины площадок износа на алмазных зернах и, как следствие, от величины фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ». Таким образом, по величине снимаемого электрического сигнала делается заключение об уровне топографической приспособляемости поверхностей РПК и СТМ.

Этот подход использован и при разработке адаптивной системы комбинированного управления режущим рельефом круга (см. гл. 7).

## **2.9. Методика изучения усталостно-циклического разрушения обрабатываемого СТМ и зерен круга при микрорезании**

Исследование процесса микрорезания единичным алмазным зерном осуществлялось в режиме ультразвукового колебания алмазного зерна по двум схемам, с поперечными и продольными амплитудами. По первой исследовалась интенсивность и характер разрушения алмазных зерен в зависимости от их марки, геометрических размеров, угла заострения, ориентации к зоне контакта (для определения влияния анизотропии свойств зерен), высоты выступания над уровнем связки. Принципиальная схема установки для исследования процесса микрорезания и усталостно-циклического микроразрушения СТМ и алмазных зерен представлена на рис. 2.12. Закрепление зерен осуществлялось с помощью специальных державок, на торец которых в подготовленные лунки они запаивались серебряным припоем на установке ТВЧ. Оценивалось изменение профилей зерен, получаемых периодически с помощью микроскопа МИМ-8 и рисовального аппарата РА-4 в двух проекциях – по вектору скорости и перпендикулярно к нему. В процессе пайки зерна предварительно ориентировались с последующим измерением на инструментальном микроскопе высоты выступания зерна над уровнем заделки, угла наклона большой оси зерна к нормали обрабатываемой поверхности, угла при вершине зерна. Поверхность СТМ подготавливалась путем алмазного шлифования мелкозернистыми кругами с последующей доводкой алмазной пастой на доводочной плите с постепенным уменьшением зернистости. Глубина царапины, оставленной алмазным зерном на поверхности СТМ, измерялась методом профилографирования и методом лазерного сканирования.



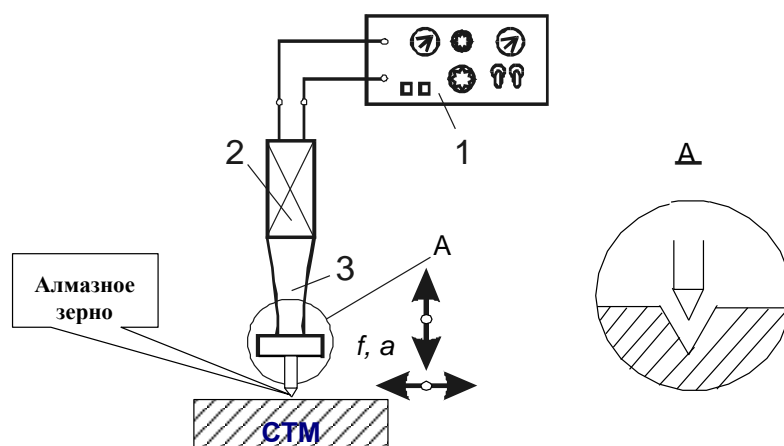


Рис. 2.12. Принципиальная схема установки для исследования процесса ультразвукового микрорезания и «долбления» единичным зерном:  
1 – генератор ультразвуковых колебаний; 2 – магнестрикционный вибратор;  
3 – концентратор

Процесс взаимного микроразрушения элементов системы «зерно–СТМ» исследовался в двух режимах: в режиме микрорезания, когда амплитуда колебания алмазного зерна параллельна поверхности СТМ, и в режиме «долбления», когда зерно колеблется по нормали к поверхности СТМ (см. рис. 2.12).

Достоинство данной методики в том, что она позволяет исследовать усталостно-циклический характер микроразрушения как алмазных зерен, так и СТМ. Методика позволяет определять число циклов контактирования до появления следа на поверхности СТМ или микроразрушения алмазного зерна.

На этом принципе базируются предложенные нами способы повышения режущей способности алмазных кругов за счет непрерывного управляемого формирования на площадках износа алмазных зерен режущего субмикрорельефа путем введения в зону управления энергии ультразвука [188]. В основу данного способа положен процесс ультразвуковой правки кругов [91].

Ультразвуковая обработка хрупких материалов основана на процессе ударного внедрения абразивных зерен, вызывающего выкалывание частиц обрабатываемого материала. На этом же механизме основано и формирование субмикрорельефа на площадках износа алмазных зерен в предложенных способах обработки [188].

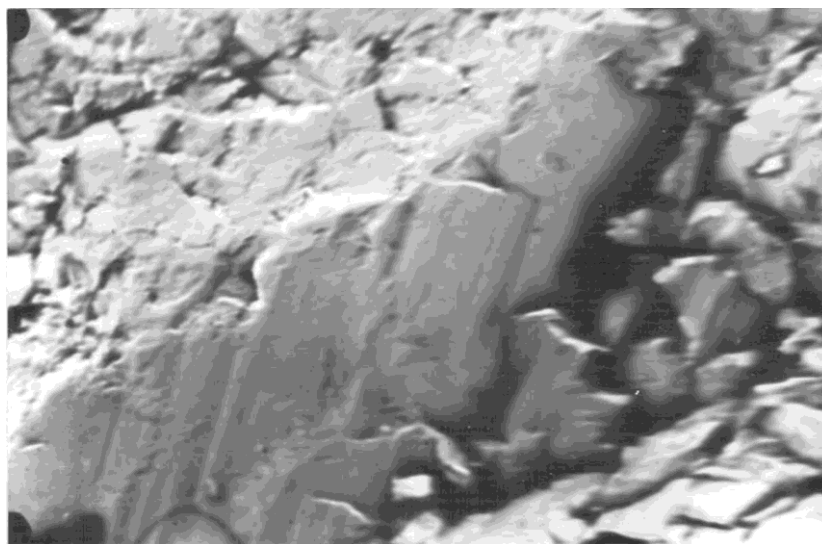
**Примечание [V254]:** Стр: 84  
[a№3032] Федорович В.А. Способы шлифования с комбинированным управлением режущим рельефом кругов. Вестник ХГПУ, Харьков. вып.45, с.26-28. {Book: Date 29/01/02 Time 22:53:19}

**Примечание [V255]:** Стр: 84  
[a№231] Кумабэ Д. Вибрационное резание: Пер. с яп. С.Л. Масленикова / Под ред. И.И. Портнова, В.В. Белова. - М.: Машиностроение, 1985. - 424 с. {Book: Date 29/01/02 Time 22:54:49}

**Примечание [V256]:** Стр: 84  
[a№3032] Федорович В.А. Способы шлифования с комбинированным управлением режущим рельефом кругов. Вестник ХГПУ, Харьков. вып.45, с.26-28. {Book: Date 29/01/02 Time 22:53:19}

Алмазные зерна марок АС32...АС160 представляют собой монокристаллы синтетических алмазов, которые можно отнести к материалам, находящимся в экстремально хрупком состоянии [71]. Осуществляя циклическое индентирование поверхности СТМ алмазным зерном, можно определять число циклов нагружения до момента образования на поверхности СТМ видимого следа. Этим экспериментом убедительно подтвердили ранее обнаруженное проявление усталостного механизма разрушения монокристаллов алмаза [164].

Теоретически и экспериментально исследовалось влияние длины начальной микротрещины, марки обрабатываемого СТМ и марки алмазного зерна на число циклов до образования следа (или лунки) на поверхности СТМ (рис. 2.13).



х 300

Рис. 2.13. След единичного алмазного зерна после 3000 циклов нагружения

Средняя величина (длина) начальной микротрещины определялась методом стереометрии [158] и по специально разработанной нами методике компьютерной обработки электронных снимков поверхности СТМ (см. п. 2.10).

Результаты исследования числа циклов нагружения до образования видимого следа при микрорезании различных марок СТМ использовались при экспериментальном исследовании усталостно-циклического микроразрушения СТМ в гл. 8.

**Примечание [V257]:** Стр: 85  
[a№3033] Новиков Н.В., Примак Л.П., Майстренко А.Л., Ващенко А.Д. Исследование распространения усталостных трещин в монокристаллах синтетических алмазов ДАН СССР.-1981 -256. С.1122-1126. {Book: Date 29/01/02 Time 23:01:48}

**Примечание [V258]:** Стр: 85  
[a№3034] Семко М.Ф. и др., ДАН, т. 220, № 6, 1303 (1975). {Book: Date 29/01/02 Time 23:11:40}

**Примечание [V259]:** Стр: 85  
[a№3036] Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. М. "Металлургия" 1976. 271 с. {Book: Date 29/01/02 Time 23:16:55}

## 2.10. Методика цветометрического компьютерного изучения параметров рабочей поверхности круга (РПК) и дефектов поверхности СТМ

Сложность структуры алмазоносного слоя, развитость режущего рельефа алмазных кругов затрудняют оптическое исследование их рабочей поверхности. Однако ряд задач такого характера можно решать с помощью металлографических микроскопов с применением специальных методик [40, 50], которые позволяют получать высокое разрешение при изучении деталей рельефа высотой до 100 ... 160 мкм.

При помощи перпендикулярно падающих поляризованных лучей света при больших увеличениях были получены снимки непосредственно с поверхности круга. В этом случае часть изображения формируется за счет некогерентных рассеянных лучей. Составляющие поверхности алмазного круга и обработанной поверхности СТМ изучались с использованием цветового контраста фаз в поляризованном свете. Каждая фаза имеет свои оптические свойства, определяющие собственные слабые деполяризационные рефлексy. Благодаря различной окраске легко дифференцируются такие составляющие алмазоносного слоя как карбид бора, алмаз, бронза и т.д.

Используя различную окраску площадок износа на алмазных зернах, а также различный цвет микрополостей на поверхности СТМ, разработали специальную программу, позволяющую в компьютерном режиме определять процентное содержание площадок износа на зернах на поверхности РПК и дефектов на поверхности СТМ. Данная программа позволяет автоматически определять процентное содержание площадок износа на алмазных зернах и относительную площадь микродефектов на обработанной поверхности СТМ.

С помощью сканера фотография рабочей поверхности круга или обработанной поверхности СТМ в поляризованном свете (рис. 2.14 а) оцифровывается и сохраняется в файле с расширением \*.bmp. Созданный файл открывается в программе (рис. 2.14) и перемещением манипулятора «мышь» с нажатой левой клавишей по изображению площадок износа или микрополости (металлофазы) выбирается их цвет для вычисления процентного содержания площадок износа на поверхности РПК. Программа позволяет выбирать объекты одного или нескольких цветов и суммирует результат.

**Примечание [V260]:** Стр: 86  
[a№3186] Грабченко А.И., Ходоревский М.Г., Синельников А.Н. Исследование состояния поверхности алмазов АСБ, АСПК методом оптической микроскопии с применением органических реплик. - Резание и инструмент, Харьков: Вища школа, 1974, вып. 11, с. 141 - 144. {Book: Date 02/03/02 Time 10:08:54}

**Примечание [V261]:** Стр: 86  
[a№3187] Децки Иван. Изучение износа алмазных и эльборовых шлифовальных кругов при помощи поляризованного микроскопа. - В кн.: I. Национальна науч.-техн. конф. с международно участие по приложению на инструменте об синтетически диаманти и други сверхтвърди материали в народно о стопанство (Габрово, 20-23 окт. 1976): Тезис докл. Габрово, 1976, с. 212-219. {Book: Date 02/03/02 Time 10:17:48}



Рис. 2.14. Компьютерная цветометрическая методика изучения параметров РПК и дефектов поверхности СТМ:  
а – фотография поверхности РПК в поляризованном свете в исходном состоянии; б – фотография поверхности РПК в поляризованном свете после цветометрического анализа; в – функциональные элементы интерфейса

Так как в фотографиях различаются около 16 миллионов цветов и их оттенков, то для более точного вычисления количества пикселей заданного цвета в программе предусмотрено изменение величин  $(R, G, B)$  –составляющих. Это позволяет подсчитать не только основной цвет, выбранный пользователем, но и его ближайшие оттенки, количество которых также выбирает пользователь.

В связи с разработкой программного продукта на языке программирования высокого уровня Borland Delphi 5.0 для Windows 95/98 или выше возникают некоторые требования к вычислительной технике, на которой будет эксплуатироваться программный продукт. Минимальные требования к вычислительной технике определяются требованиями для Windows 95/98 или выше и составляют: 1) IBM PC AT совместимый компьютер с процессором 486SX-33 или более мощным; 2) видео карта VGA емкостью не менее 512 Кбайт; 3) объем ОЗУ не менее 16 Мбайт; 4) НЖМД (винчестер) не менее 40 Мбайт; 5) Windows 95/98 или выше.

Выбор языка программирования Delphi связан с удобством обработки очень объёмных структур данных, а также с возможностью реализации удобного интерфейса (см. рис. 2.14).

Использование разработанной методики существенно сокращает трудоемкость и время экспериментального изучения параметров РПК и структуры обработанной поверхности СТМ. Полученные результаты использованы при определении фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ».

Сравнение результатов изучения относительной площади площадок износа на зернах РПК по данной методике с методикой лазерного сканирования для определения параметра относительной опорной площади РПК подтвердило ее достаточную точность.

## Выводы

1. Разработана методология исследования, основанная на комплексном 3D теоретическом и экспериментальном изучении процесса приспособляемости элементов системы «СТМ – зерно – связка», реализующая 7 принципов, составляющих физические представления сути протекающих процессов. Эта методология может быть эффективно использована при исследовании любых триботехнических систем для определения оптимальных условий их функционирования.

2. Адаптированная к решаемой задаче методика лазерного сканирования и компьютерной обработки 3D топографии поверхности РПК и обработанной поверхности СТМ открывает новые возможности для исследования динамики изменения 3D параметров РПК и СТМ и, что особенно важно, позволяет оценивать 3D параметры субмикрорельефа отдельных алмазных зерен. По величине относительной опорной площади исследуемых поверхностей можно судить об изменении фактической площади контакта в системе «РПК – СТМ».

3. Использование пакета прикладных программ для метода конечных элементов при 3D моделировании напряженно-деформированного состояния единой системы «СТМ–зерно–связка» позволяет в максимально приближенных к реальным условиям оценивать взаимовлияние физико-механических свойств алмазных зерен, СТМ и связки на поля главных и приведенных силовых, температурных и термосиловых напряжений, энергии и плотности энергии деформации, частоту собственных колебаний алмазных зерен.

4. Разработана методика контроля динамической прочности алмазных зерен непосредственно в круге, основанная на определении числа циклов ультразвукового нагружения до разрушения алмазных зерен на РПК мелкими и высокопрочными алмазными инденторами (зернами) и учитывающая жесткость связки. С дополнением предложенной методики определения удельного износа и коэффициента использования потенциальных режущих свойств алмазных зерен, эта позволяет оценивать эффективность алмазного шлифования СТМ и подбирать оптимальные пары «марка СТМ – марка алмазного зерна». Данная комплексная методика определения работоспособности алмазно-абразивного инструмента по сравнению с традиционно используемой существенно повышает достоверность контроля качества алмазных кругов.

5. Разработанная методика оценки уровня приспособляемости при алмазном шлифовании СТМ, основанная на использовании электризации трущихся алмазных пар, может быть успешно применена для адаптивной системы управления параметрами РПК.

6. Предложен и реализован цветометрический метод компьютерной обработки фотографий рабочей поверхности круга и обработанной поверхности СТМ, полученных в поляризованном свете, позволяющий в автоматическом режиме определять параметры РПК, параметры хрупкого и пластического разрушения СТМ, относительную площадь и длину дефектов на обработанной поверхности СТМ. Разработана методика, алгоритмы и программное обеспечение для ее реализации в виде готового программного продукта.

7. Разработана методика определения коэффициента использования потенциальных режущих свойств алмазных зерен, основанная на особенностях взаимного микроразрушения элементов системы «СТМ–зерно–связка» и использовании в качестве измерительной базы поверхности площадок на зернах, стабильно образующихся в результате специального испытания круга при шлифовании алмазного образца (а. с. №1404892).

8. Созданный экспериментальный стенд обеспечивает осуществление и исследование процесса ультразвукового алмазного шлифования с адаптивным комбинированным управлением приспособляемостью за счет дозируемого целенаправленного удаления связки и ультразвукового формирования режущего субмикрорельефа на алмазных зернах. Модернизированное по разработанной документации технологическое оборудование обеспечивает реализацию процесса в производственных условиях.



## Глава 3

### Моделирование процесса спекания алмазных кругов

Раздел посвящен анализу теоретических исследований процесса изготовления алмазных шлифовальных кругов на металлической связке с целью определения условий снижения количества разрушенных зерен в инструменте после спекания. Теоретические исследования проведены путем 3D моделирования напряженно-деформированного состояния зоны спекания алмазоносного слоя круга. Установлено влияние технологических параметров процесса и характеристик алмазоносного слоя на целостность зерен в круге, сформулированы практические рекомендации по составам алмазно-металлических композиций.

#### 3.1. Влияние технологических режимов спекания кругов и свойств связок на целостность алмазных зерен

Как показал анализ литературных источников (см. п. 1.3), технология изготовления алмазно-металлических композиций методами порошковой металлургии вносит существенные коррективы в свойства готового инструмента по сравнению со свойствами компонентов, используемых при его изготовлении. Особенно это касается целостности алмазных зерен, одного из важнейших показателей работоспособности шлифовального круга.

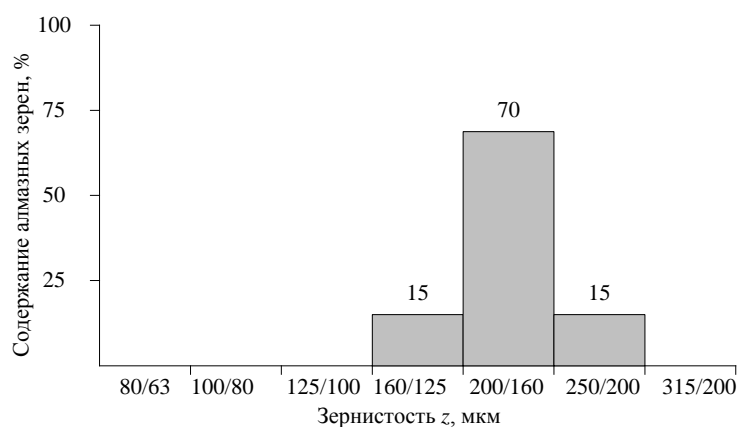
Для обоснования необходимости проведения теоретических исследований зоны спекания осуществлялось извлечение зерен из алмазоносного слоя нового шлифовального круга 12A2-45° 150×10×3×32 ГОСТ 16172-80 AC6 200/160 M2-01 4 по технологии очистки алмазного порошка от растворимых примесей (см. п. 2.7). Из извлеченных зерен были произвольно выбраны 100 штук и измерены на двулучевом микроинтерферометре В. П. Линника МИИ-4М. Их размеры были разбиты на 6 групп (табл. 3.1).

Гистограмма распределения размеров зерен у нормированного порошка зернистостью 200/160 (рис. 3.1 а) показывает наличие в нем зерен основной фракции (200/160) в количестве не менее 70 %, крупной (250/200) и мелкой

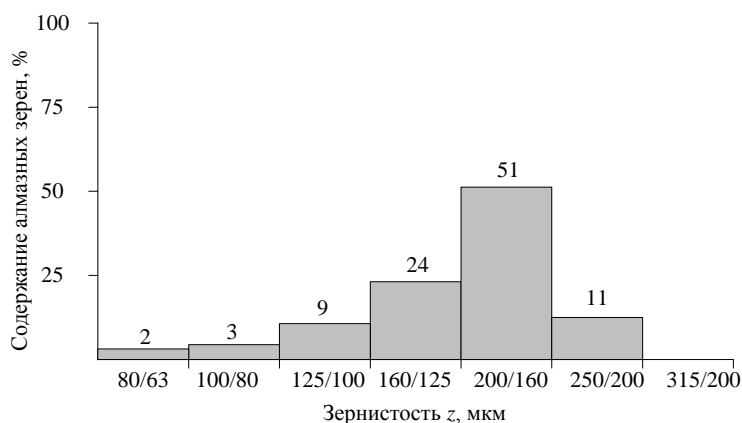
(160/125) – в количестве не более 15 % каждой, отсутствие предельной (315/250) фракции [0]. Гистограмма распределения размеров по зернистостям у порошка, извлеченного из круга (рис. 3.1 б), показала, что количество алмазных зерен основной фракции в спеченном алмазоносном слое уменьшилось на 19 %, крупной – на 4 %, мелкой возросло на 9 % по сравнению с исходным для спекания нормированным алмазным порошком. Появились три более мелкие фракции в количестве: 9 % – 125/100, 3 % – 100/80 и 2 % – 80/63. Степень повреждения алмазных зерен, определяемая по аналогии с Н. В. Новиковым [1] как отношение разрушенных зерен к общему их количеству, составляет  $\sim 0.3$ .

**Примечание [G262]:** Стр: 92  
ДСТУ 3292-95

**Примечание [G263]:** Стр: 92  
Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н. Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов. - Киев: Наук. думка, 1993. – 220 с.



а



б

Рис. 3.1. Количественное распределение алмазных зерен по зернистостям:  
а – нормированного алмазного порошка; б – алмазного порошка, извлеченного из круга

Таблица 3.1 – Размеры зерен, извлеченных из алмазносного слоя круга

Размеры зерен, мкм	55×125	85×200	115×160	135×200	165×255	185×310
Количество зерен	2	3	9	24	51	11

Таким образом, технологический прием формирования алмазносного слоя кругов на металлических связках приводит к разрушению части зерен, особенно крупной и основной фракций. При этом в эксплуатацию попадают шлифовальные круги с характеристиками, существенно отличающимися от приведенных в маркировке, так как фактические размеры их зерен оказываются в 1.25–2 раза меньше размеров, соответствующих указанной на круге зернистости. Тогда и объем сошлифованного единичным зерном материала, и условия их удержания связкой будут отличаться от аналогичных параметров для кругов со стандартными характеристиками, подобные круги не могут реализовывать ожидаемые показатели алмазно-абразивной обработки.

Исходя из вышеизложенного, представляется целесообразным определение составов и условий изготовления алмазных кругов на металлической связке, обеспечивающих максимальное сохранение целостности зерен в инструменте после спекания. С этой целью осуществлялось 3D моделирование напряженно-деформированного состояния алмазносного слоя, возникающего при его спекании по методике, изложенной в п. 2.2. Одна серия расчетов проводилась для фрагмента алмазносного слоя, включающего единичное алмазное зерно, окруженное массивом металлической связки (рис. 3.2 а), другая – рассматривала фрагмент алмазносного слоя, включающий два алмазных зерна, объединенных связкой (рис. 3.2 б). Здесь варьировалось соотношение размеров алмазных зерен и размеров массива связки, окружающего эти зерна, что соответствовало различным значениям зернистости и концентрации (от 1 до 200 %) алмазов в спекаемом слое [43]. Наличие металлической фазы в алмазных зернах моделировалось произвольно ориентированными прослойками металлофазы, объемное содержание которых составляло в зависимости от рассматриваемой зернистости 0.1–10 %. Теоретические расчеты в пакете прикладных программ позволили в компьютерном режиме количественно оценить напряжения, энергию деформации и плотность энергии деформации в спекаемых элементах в зависимости от их размеров, физико-механических свойств, концентрации алмазов и условий спекания. Объемы алмазных зерен считались разрушенными, если приведенные напряжения и/или плотность энергии деформации в них превышали соответствующие предельные значения.

**Примечание [G264]:** 1. Стр. 93  
Козакова Н.В. Влияние прочности связки, алмазных зерен и их концентрации на работоспособность шлифовального круга // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ» – 2003. – Вип. 2(7). – С. 45-50.

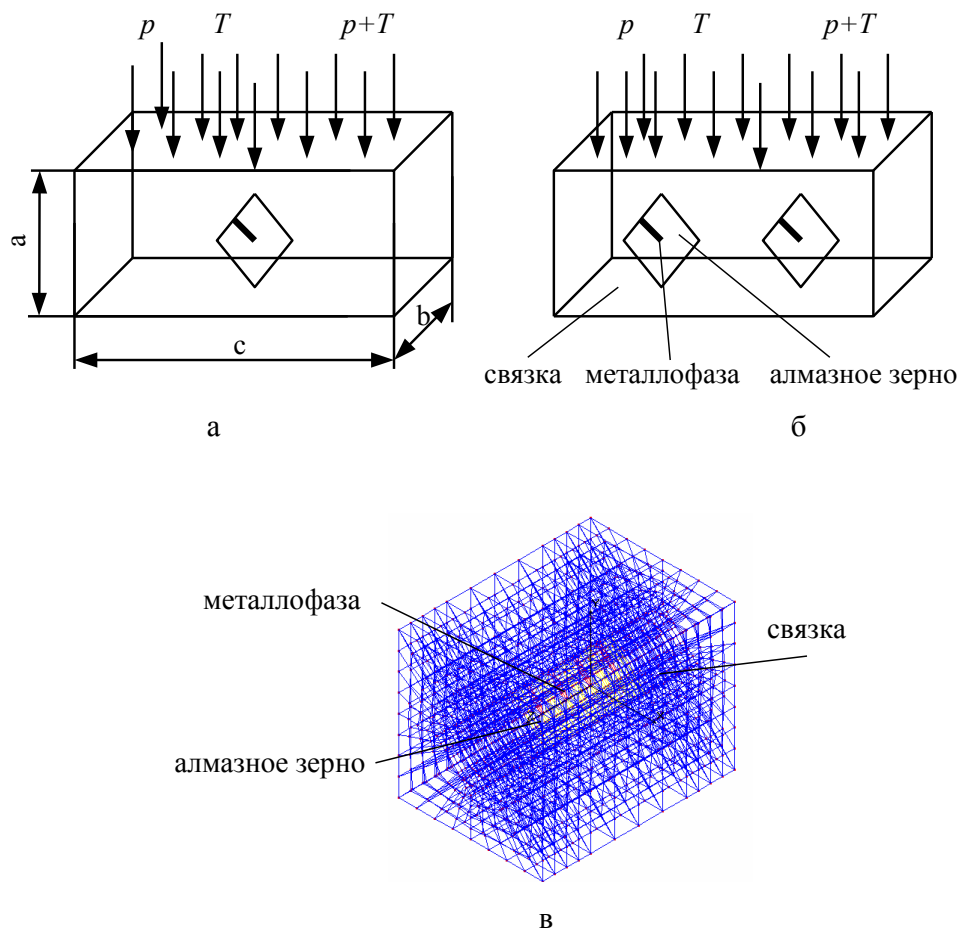


Рисунок 3.2 – Расчетные схемы и 3D конечно-элементная сетка для моделирования НДС системы «алмазное зерно–связка» в процессе спекания кругов:  
 а – расчетные схемы фрагмента круга с разной концентрацией зерен;  
 б – конечно-элементная модель фрагмента алмазного круга

Факторами, влияющими на целостность алмазных зерен, являются, прежде всего, технологические особенности изготовления кругов, а также состав спекаемой композиции. Главными компонентами алмазоносного слоя являются алмазные зерна определенной марки, зернистости и концентрации, связка определенного типа и марки. В комплексе они обуславливают работоспособность инструмента.

Марка металлической связки круга в большой степени определяет технологические параметры спекания алмазоносного слоя. Поэтому влияние ее

свойств и режимов спекания на 3D напряженно-деформированное состояние алмазоносного слоя является взаимосвязанным.

Исследовались три группы металлических связок: на основе медь–олово – М2-01, М2-09; на основе медь–алюминий–цинк – М1-01, М1-04, М1-05; на основе железо–никель–кобальт – М6-14, М6-16. В расчетной модели задавались следующие свойства связок: модуль упругости  $E$ , модуль объемного сжатия  $G$ , коэффициент Пуассона  $\mu$ , предел текучести  $\sigma_T$ , коэффициент линейного термического расширения  $\alpha$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , коэффициент температуропроводности  $a$ , коэффициент удельной теплоемкости  $c$ .

Нагружение системы «алмазное зерно–связка» осуществлялось по трем вариантам:

- приложением давления от 50 до 500 МПа;
- приложением температуры от 400 до 900°C;
- одновременным приложением давления и температуры.

В качестве реакции модели на нагружение рассматривались приведенные напряжения в узлах сетки, принадлежащих модели алмазного зерна (индекс 1) и окружающей его связки (индекс 2). Сгенерированная конечно-элементная сетка модели в плоскости ХОУ представлена на рис. 3.3 а.

При нагружении системы давлением 300 МПа напряжения в алмазном зерне АС6 125/100 и в связке составили соответственно:

$\sigma_1 = 82.7$  МПа,  $\sigma_2 = 25.0$  МПа – для алмазоносного слоя на основе меди и алюминия;

$\sigma_1 = 90.0$  МПа,  $\sigma_2 = 34.5$  МПа – для алмазоносного слоя на основе меди и олова;

$\sigma_1 = 122.5$  МПа,  $\sigma_2 = 75.3$  МПа – для алмазоносного слоя на основе железа.

Напряжения в зерне не превышают предела прочности при растяжении данной марки и данной зернистости.

Давление до 300 МПа даже для наименее прочных марок алмазных зерен не приводит к их разрушению. Давление 500 МПа, характерное для брикетирования некоторых алмазных композиций на железо–никель–кобальтовых связках, создает напряжения в связке  $\sigma_2 = 97.9$  МПа и в зерне  $\sigma_1 = 200.0$  МПа, несколько превышающее предел прочности марки АС4 на растяжение (рис. 3.3 б). Очаги критических напряжений в этом случае рас-

полагаются в вершинах октаэдра и фактически не нарушают целостности зерна. Лишь в 4 элементах модели алмазного зерна приведенные напряжения превысили предел прочности на растяжение, и объемы разрушенного зерна составили  $7 \cdot 10^{-5}$  мкм<sup>3</sup>. Зависимости напряжений в системе «алмазное зерно–связка» от давления (рис. 3.4) показывают, что нагружение исследуемой системы только давлением во всем интервале его технологических значений для различных видов связок и марок алмазных зерен незначительно влияет на напряжения в исследуемой системе и не приводит к нарушению целостности алмазных зерен. Таким образом, давление практически не разрушает алмазные зерна.

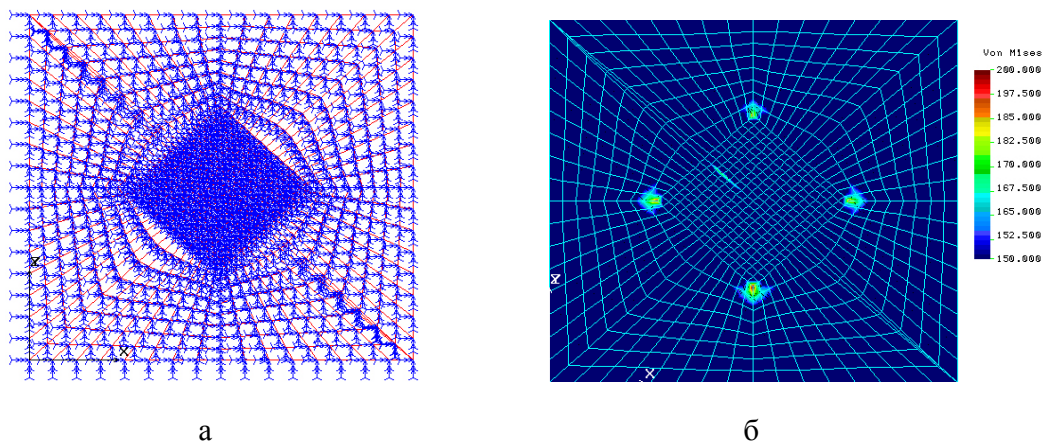


Рис. 3.3. Конечно-элементная сетка и приведенные напряжения в системе «алмазное зерно–связка» при нагружении давлением  $p = 500$  МПа:

АС4 100/80 М6-14;

а – конечно-элементная модель зоны спекания;

б – приведенные напряжения в зоне спекания

Напряжения, вызванные воздействием температуры, имеют гораздо большие значения и иную картину распределения. Увеличение напряжений наблюдается по контуру сферы, вписанной в октаэдр, и в местах сосредоточения металлофазы в зерне (рис. 3.5 а). Для спека алмаза со связкой М1-01 напряжения в зерне АС20 250/200 и в связке составляют соответственно:

- при  $T=450^{\circ}\text{C}$ :  $\sigma_1 = 104.0$  МПа,  $\sigma_2 = 26.0$  МПа;
- при  $T=500^{\circ}\text{C}$ :  $\sigma_1 = 109.0$  МПа,  $\sigma_2 = 30.0$  МПа;
- при  $T=550^{\circ}\text{C}$ :  $\sigma_1 = 112.0$  МПа,  $\sigma_2 = 32.5$  МПа.

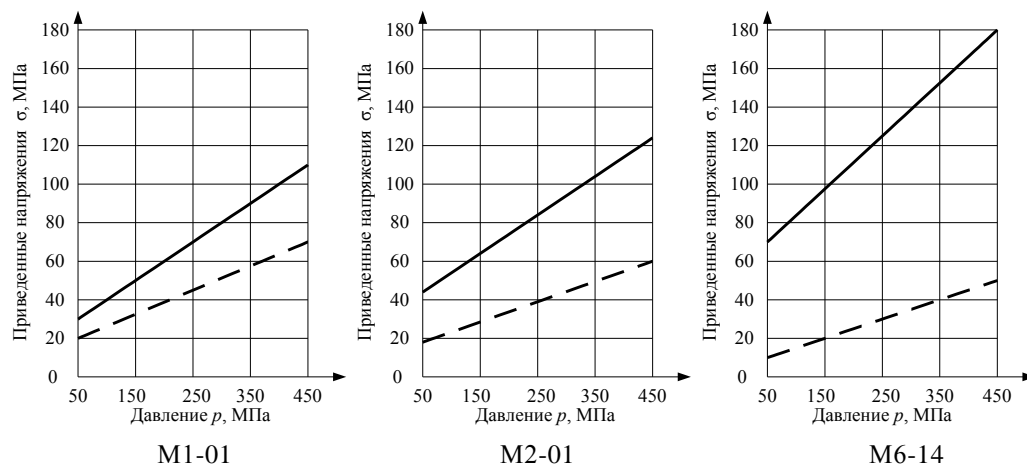
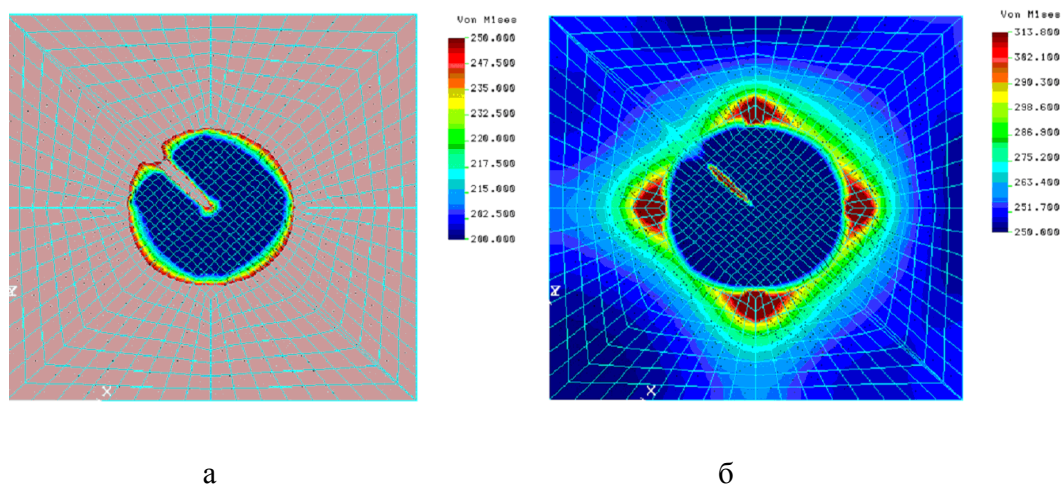


Рис. 3.4. Влияние давления на приведенные напряжения в системе «алмазное зерно–связка»: AC20 250/200;  
 ————— напряжения в зерне; ————— напряжения в связке



Зависимости напряжений в системе «алмазное зерно–связка» от температуры для различных видов металлических связок представлены на рис. 3.6. Причиной роста напряжений в системе с увеличением температуры является, очевидно, структурная неоднородность алмазных зерен и значи-



тельная разница в коэффициентах термического расширения алмазной и металлической фаз, вызывающие под действием температуры расширение включений и появление внутренних напряжений в зерне.

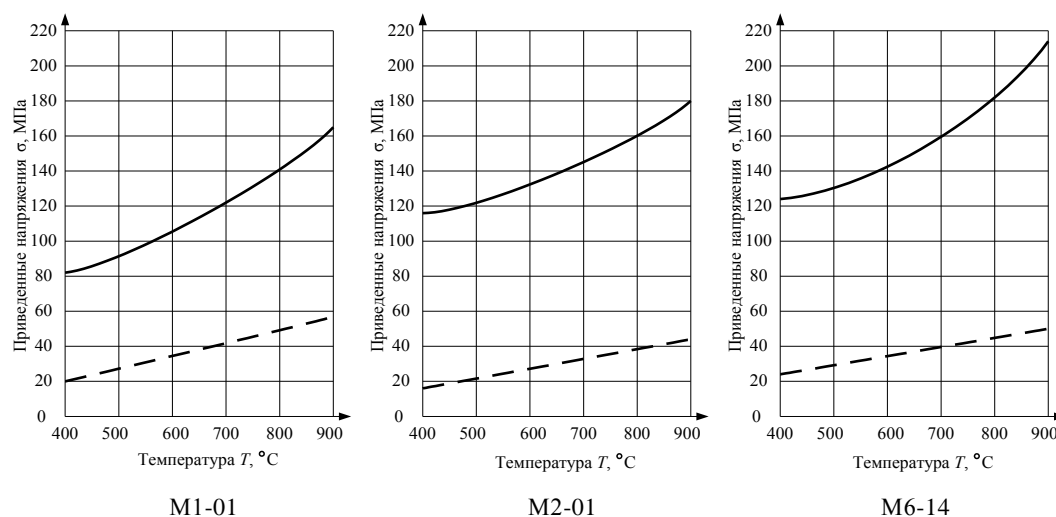


Рис. 3.6. Влияние температуры спекания на приведенные напряжения в системе «алмазное зерно–связка»: AC20 250/200; ————— напряжения в зерне; ————— напряжения в связке.

Термосиловые напряжения в системе «алмазное зерно–связка», вызываемые воздействием давления и температуры, по характеру распределения своих максимальных значений напоминают картины термических напряжений (см. рис. 3.5 б), а по величине – превышают их в среднем на 12 % для одних и тех же условий (рис. 3.7).

Напряжения, превышающие пределы прочности алмазных зерен и располагающиеся вдоль прослоек металлофазы, обуславливают внутреннюю трещину в зерне, а напряжения на периферии спекаемого зерна распределены таким образом, что будут стараться отколоть от зерна его остро-выступающие участки (режущие кромки) и тем самым овализировать форму (скруглить режущие кромки), что впоследствии отрицательно скажется на режущей способности зерна и круга в целом.

Как и с увеличением температуры спекания, увеличение модуля упругости металлической связки приводит к тому, что напряжения в ней и в зерне растут и могут достигать предела прочности для определенных марок алмаза. На рис. 3.8 представлены поля приведенных напряжений для зерна

марки АС6, спекаемого с различными видами связок при технологических режимах, соответствующих их физико-механическим свойствам. Очагом возникновения предельных напряжений во всех случаях является область металлических включений. С повышением прочности связок в направлении М1-01, М2-01, М6-14 наряду с ростом величин напряжений наблюдается рост участков, на которые они распространяются, разрушая при этом все большие объемы алмазного зерна. Объяснением этого могут быть, очевидно, возросшие значения напряжений в связке, оказывающие усиливающее воздействие на напряжения в зерне.

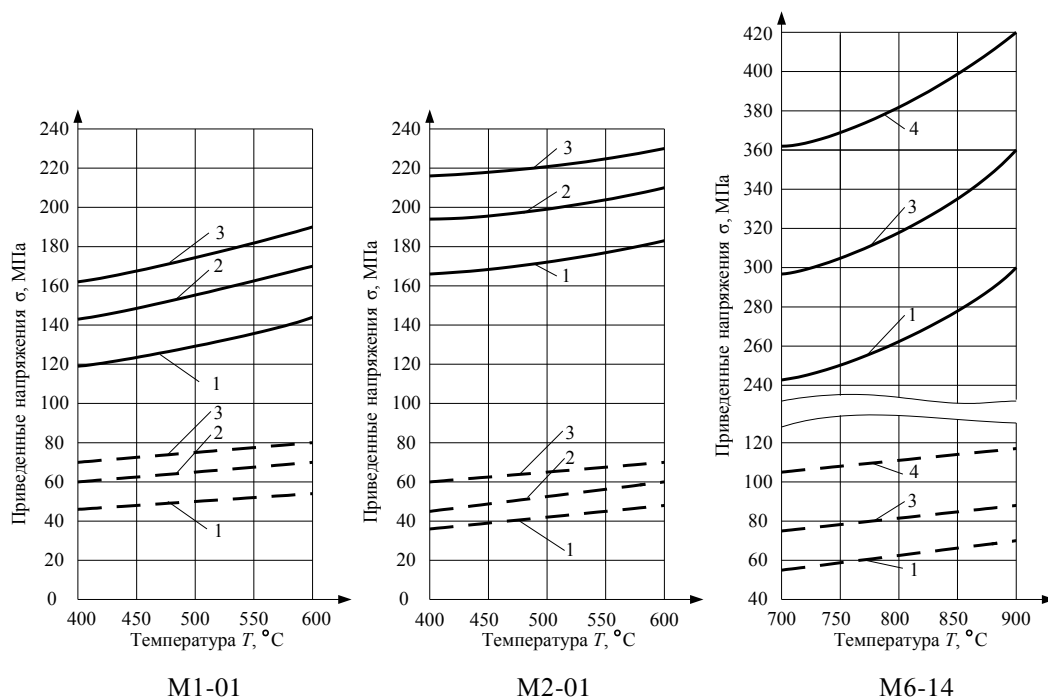


Рис. 3.7. Влияние давления и температуры на приведенные напряжения в системе «алмазное зерно–связка»: АС20 250/200;  
 1 –  $p = 100$  МПа, 2 –  $p = 200$  МПа, 3 –  $p = 300$  МПа, 4 –  $p = 500$  МПа;  
 ———— напряжения в зерне; ----- напряжения в связке

Таким образом, наиболее значимым с точки зрения сохранения целостности зерен в процессе изготовления алмазонасного слоя круга технологическим параметром является температура спекания и допрессовки, а увеличение модуля упругости металлической связки усиливает напряженное состояние зерна [40].

**Примечание [G265]:** Стр. 99  
 Козакова Н.В., Наконечный Н.Ф., Федорович В.А. 3D моделирование при определении оптимальных характеристик алмазных кругов // Високі технології в машинобудуванні: 36. наук. праць НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ» – 2004. – Вип. 1(8). – С. 81-86.

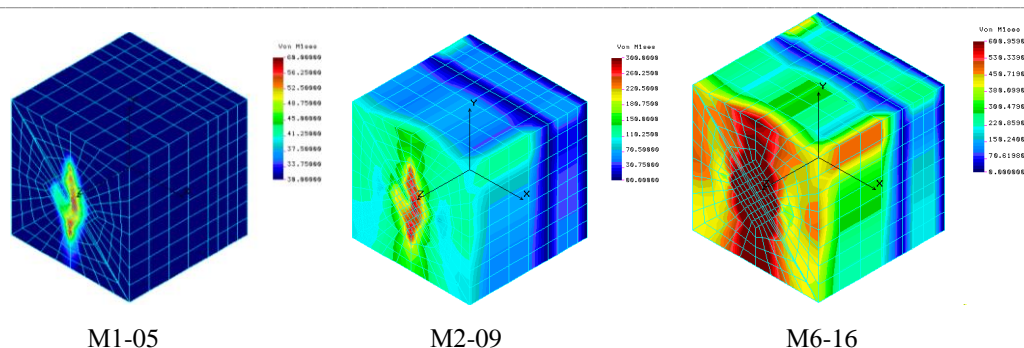


Рис. 3.8. Влияние марки связки на 3D поля приведенных напряжений в системе «алмазное зерно–связка»: AC6 125/100

### 3.2. Влияние марки алмазных зерен на их целостность при спекании

Марка алмазного зерна определяет его прочность, связанную, прежде всего с содержанием примесей, совершенством формы, внутренней и поверхностной дефектностью [2]. Каждой марке соответствуют определенные термобарические и кинетические условия синтеза, состав растворителя углерода, марка графита, расположение реакционных компонентов, технология обогащения, режимы дробления и сортировки, которые и обеспечивают необходимый уровень ее прочностных свойств.

Наиболее важным параметром, определяющим целостность алмазных зерен в процессе спекания кругов, является их прочность. Причем, находясь в условиях одноосного сжатия при брикетировании или горячей допрессовке, зерна могут разрушаться не только от напряжений сжатия, но и от напряжений растяжения, действующих в направлении, перпендикулярном приложению сжимающей нагрузки. Поскольку предел прочности при растяжении несколько ниже предела прочности при сжатии, то в качестве критерия разрушения принимались полученные расчетным путем значения предела прочности при растяжении алмазов различных марок и зернистостей.

Экспериментальное определение предела прочности при растяжении алмазных зерен традиционными методами невозможно из-за сложности изготовления стандартных образцов требуемых размеров, поэтому его значения находили косвенно по результатам испытаний на диаметрально сжатие [2а]. При

**Примечание [G266]:** Стр: 100  
Синтез алмазов / Новиков Н.В., Федосеев Д.В., Шульженко А.А. Богатырева Г.П.; Под ред. Новикова Н.В. – Киев: Наук. думка, 1987. – 160 с.

**Примечание [G267]:** Стр: 100  
Федорович В.А., Козакова Н.В. Влияние прочности элементов системы «СТМ–зерно–связка» на эффективность шлифования // Вісник НТУ «ХП». Тем. вип: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХП». – 2003. – № 9, т. 1. – С. 85–92.

этом возникали две группы дополнительных методических погрешностей, первая из которых обусловлена отличием реального контакта образца с опорами нагружающего устройства от идеального, а вторая связана с обоснованием выбора критерия прочности – необходимостью применять одну из теорий прочности для расчета  $\sigma_p$  по результатам испытаний на диаметрально сжатие  $\sigma_k$  [3]:

$$\sigma_k = \frac{P}{dt}, \quad (3.1)$$

где  $\sigma_k$  – средняя по сечению прочность, определяемая при диаметрально сжатии образца диаметром  $d$  и высотой  $t$  разрушающим усилием  $P$ . Для перехода от  $\sigma_k$  к  $\sigma_p$  использовали выражение вида:

$$\sigma_p = B\sigma_k, \quad (3.2)$$

где  $B$  – коэффициент, зависящий от выбора критерия прочности. В случае хрупких материалов, какими являются СТМ, наиболее достоверным является критерий Г. С. Писаренко – А. А. Лебедева [4], учитывающий их структурную неоднородность. Учет этого критерия в выражении (3.2), а также ряд преобразований и упрощений привели к выражению:

$$\sigma_p = \frac{0.41\sigma_k\sigma_c}{\sigma_c - 1.89\sigma_k}, \quad (3.3)$$

где  $\sigma_c$  – предел прочности при одноосном сжатии.

На основе данных о прочности алмазных зерен при статическом сжатии [5] вычислялись  $\sigma_p$  для всех марок исследуемых алмазных зерен (табл. 3.2).

Полученные таким образом значения предела прочности при растяжении использовались в качестве сравнительной базы. Считалось, что объем, в котором приведенные напряжения превышают эти предельные значения, разрушится.

Поскольку на прочность шлифпорошков алмазов оказывает влияние ряд факторов, то, определив степень значимости каждого из них, в рассматриваемой модели учитывали наиболее важные. Несмотря на то, что примеси в алмазных кристаллах представляют собой и остатки металлов–растворителей, используемых при синтезе, и газы, преимущественно кислород, водород, а также графит и элементы, содержащиеся в материалах контейнера и находящиеся в реакционном объеме камер высокого давления, основную массу включений, как правило, составляют металлы. Алмазы, полученные в различных ростовых

**Примечание [G268]:** Стр: 101  
Новиков Н.В., Андросов И.М., Майстренко А.Л. Методика определения прочности и трещиностойкости поликристаллических сверхтвердых материалов // Сверхтвердые материалы. – 1982. - №2. – С. 33-37.

**Примечание [G269]:** Стр: 101  
Девин Л.Н. Определение предела прочности при растяжении поликристаллических сверхтвердых материалов // Сверхтвердые материалы. – 1988. - №2. – С. 24-28. 4.

**Примечание [G270]:** Стр: 101  
Стр: 101  
ДСТУ 3292-95

системах, имеют различный качественный состав металлических включений: для системы Ni-Mn-C – это в основном Ni, Mn, Ca, Si, и Fe; для Fe-Co-C – Fe, Co, Mn, и Cr; для Fe-Ni-C – Fe, Ni, Cr, и Mn. Хотя количественно состав примесей в зернах алмаза одной и той же марки может изменяться в довольно широком диапазоне, однако для каждой марки существует наиболее вероятное их количество, определяемое не только условиями синтеза, но и сортировки.

На прочность алмазных зерен значительное влияние оказывают также форма (габитус), которая может меняться от игольчатой и пластинчатой до изометричной, кристалломорфологический тип алмазного зерна, который может быть представлен монокристаллами, их осколками, сростками, агрегатами и поликристаллами [6], топография поверхности зерна, изменяющаяся от гладкой до шероховатой с выемками, наростами, трещинами, раковинами и пустотами. Из-за трудностей учета многообразия форм и топографии поверхности алмазных зерен (его форма представлялась октаэдром, что соответствует действительности лишь для марки AC32 и выше), отличие в прочностных свойствах различных марок алмазных зерен в модели выражалось разным количественным составом металлических включений в них, которые представляли собой твердый раствор металлов Ni и Mn.

Расчеты влияния на величины напряжений и энергии деформации в алмазных зернах различных марок показали, что прочность является определяющим фактором разрушения зерна. Во-первых, поскольку каждой марке алмазного зерна соответствует определенное значение предела прочности, которое снижается по мере уменьшения числового индекса марки и превышение которого свидетельствует о нарушении целостности зерна. Во-вторых, поскольку каждой марке алмазного зерна в расчетной модели соответствует определенное количество включений, это вносит существенные изменения не только в картину распределения напряжений во включениях, их численные значения, но и в напряженно-деформированное состояние всего алмазного зерна.

Для всех рассматриваемых марок алмазных зерен наибольшие значения напряжений соответствуют областям вблизи включений (рис. 3.9). Очевидно, это объясняется существенным различием приведенного модуля упругости и коэффициента термического расширения (~ в 4 раза) эвтектики Ni+Mn и соответствующих свойств алмаза, что под воздействием температуры спекания приводит к расширению включений на 15–20 % [7]. Возникающее при этом внутреннее давление обуславливает значительные напряжения по контуру включений.

**Примечание [G271]:** Стр: 102  
ДСТУ 3292-95

**Примечание [G272]:** Стр: 102  
Новиков Н.В., Шульженко А.А., Никитин Ю.И., Кацай М.Я., Уман С.М., Мельник В.И., Якименко Д.В. Термостойкие высокопрочные шлифпорошки синтетических алмазов // Сверхтвердые материалы. – 1984. - №5. – С. 33-35.

Таблица 3.2 – Показатели прочности различных марок алмазных зерен

Зерни- стость z, мкм	Предел прочности при растяжении $\sigma_p$ , ГПа													
	Разрушающая нагрузка при статическом сжатии $P$ , Н													
	AC2	AC4	AC6	AC15	AC20	AC32	AC50	AC65	AC80	AC100	AC125	AC160		
50/40	$\frac{0.35}{1.5}$	$\frac{0.6}{2.5}$	$\frac{0.84}{3.8}$	$\frac{2}{6.5}$	$\frac{2.3}{8.8}$	–	–	–	–	–	–	–		
63/50	$\frac{0.22}{1.6}$	$\frac{0.37}{2.6}$	$\frac{0.67}{4.1}$	$\frac{1.4}{7.6}$	$\frac{2.05}{10.3}$	$\frac{5.37}{14}$	–	–	–	–	–	–		
80/63	$\frac{0.14}{1.7}$	$\frac{0.27}{29}$	$\frac{0.41}{4.4}$	$\frac{0.88}{8.6}$	$\frac{1.19}{11.8}$	$\frac{2.8}{16.2}$	$\frac{5.82}{23}$	–	–	–	–	–		
100/80	$\frac{0.09}{1.8}$	$\frac{0.19}{3.6}$	$\frac{0.27}{4.9}$	$\frac{0.59}{9.5}$	$\frac{0.87}{13.3}$	$\frac{1.8}{20.4}$	$\frac{3}{28}$	$\frac{6.6}{38}$	–	–	–	–		
125/100	$\frac{0.067}{2}$	$\frac{0.12}{4.1}$	$\frac{0.198}{5.8}$	$\frac{0.53}{10.8}$	$\frac{0.64}{14.7}$	$\frac{1.1}{24.5}$	$\frac{1.78}{33}$	$\frac{2.9}{43}$	$\frac{5.2}{55}$	$\frac{11.7}{68}$	–	–		
160/125	$\frac{0.046}{2.2}$	$\frac{0.11}{5}$	$\frac{0.14}{6.8}$	$\frac{0.278}{13}$	$\frac{0.4}{17.6}$	$\frac{0.73}{29}$	$\frac{1.45}{38}$	$\frac{1.7}{51}$	$\frac{2.6}{65}$	$\frac{4.45}{83}$	$\frac{8}{100}$	$\frac{13}{120}$		
200/160	–	$\frac{0.07}{6}$	$\frac{0.106}{8}$	$\frac{0.2}{15.1}$	$\frac{0.27}{20.6}$	$\frac{0.5}{33.5}$	$\frac{0.79}{48}$	$\frac{1.14}{63}$	$\frac{1.47}{75}$	$\frac{2.18}{95}$	$\frac{3.48}{120}$	$\frac{6.79}{153}$		
250/200	–	–	$\frac{0.07}{9.2}$	$\frac{0.14}{17.3}$	$\frac{0.2}{23.5}$	$\frac{0.32}{38}$	$\frac{0.58}{55}$	$\frac{0.79}{75}$	$\frac{0.93}{85}$	$\frac{1.34}{110}$	$\frac{1.97}{140}$	$\frac{3.1}{178}$		
315/250	–	–	–	$\frac{0.11}{20.5}$	$\frac{0.129}{27.4}$	$\frac{0.22}{46}$	$\frac{0.39}{65}$	$\frac{0.54}{85}$	$\frac{0.66}{100}$	$\frac{0.9}{130}$	$\frac{1.17}{163}$	$\frac{1.74}{205}$		
400/315	–	–	–	–	$\frac{0.106}{33}$	$\frac{0.18}{55}$	$\frac{0.27}{76}$	$\frac{0.37}{100}$	$\frac{0.45}{120}$	$\frac{0.59}{150}$	$\frac{0.79}{190}$	$\frac{1.26}{230}$		
500/400	–	–	–	–	–	$\frac{0.14}{66}$	$\frac{0.2}{91}$	$\frac{0.27}{120}$	$\frac{0.34}{145}$	$\frac{0.43}{180}$	$\frac{0.56}{228}$	$\frac{0.68}{265}$		

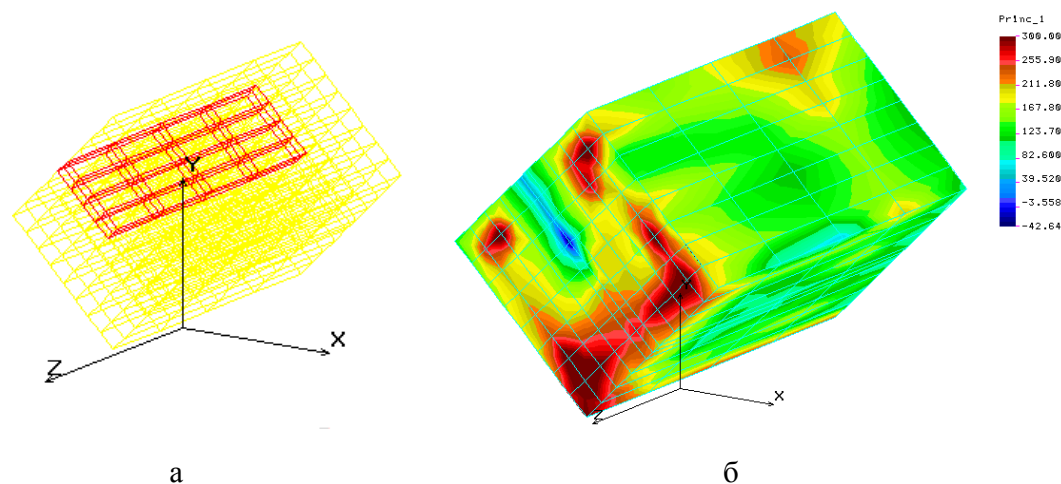


Рис. 3.9. Конечно-элементная расчетная схема (а) и главные напряжения (б) в системе «алмазное зерно–связка»: AC15 100/80 M2-01

Чем меньше индекс марки алмазного зерна, тем больший объем занимают в нем металлические включения, инициируя большие не только по занимаемой площади, но и по величине напряжения в зерне, снижающейся в направлении от включений к периферии (рис. 3.10). Главные напряжения, превышающие предел прочности на растяжение алмаза, занимают 72 % объема зерна марки AC4, 56 % – марки AC6 и 35 % – марки AC15 для зернистости 125/100 и связки М6-14.

Увеличение содержания включений в объеме алмазного зерна с 0.5 до 10 % приводит к увеличению значений главных напряжений почти в 2.5 раза, энергии деформации – в 5 раз, плотности энергии деформации почти – 10 раз. Данные показатели напряженно-деформированного состояния спекаемого алмазосодержащего слоя представлены на рис. 3.11.

Монокристаллические зерна марок AC15, AC20, AC32 при спекании со связками на железо-никель-кобальтовой основе могут разрушаться вследствие образования внутренней дисковой трещины, ориентированной перпендикулярно к области сосредоточения металлических включений. Для таких высокопрочных марок алмаза как AC50...AC160 максимальные растягивающие напряжения, возникающие в зернах при спекании с различными металлическими связками, в 5...10 раз меньше их предела прочности, что практически исключает разрушение этих зерен (рис. 3.12).



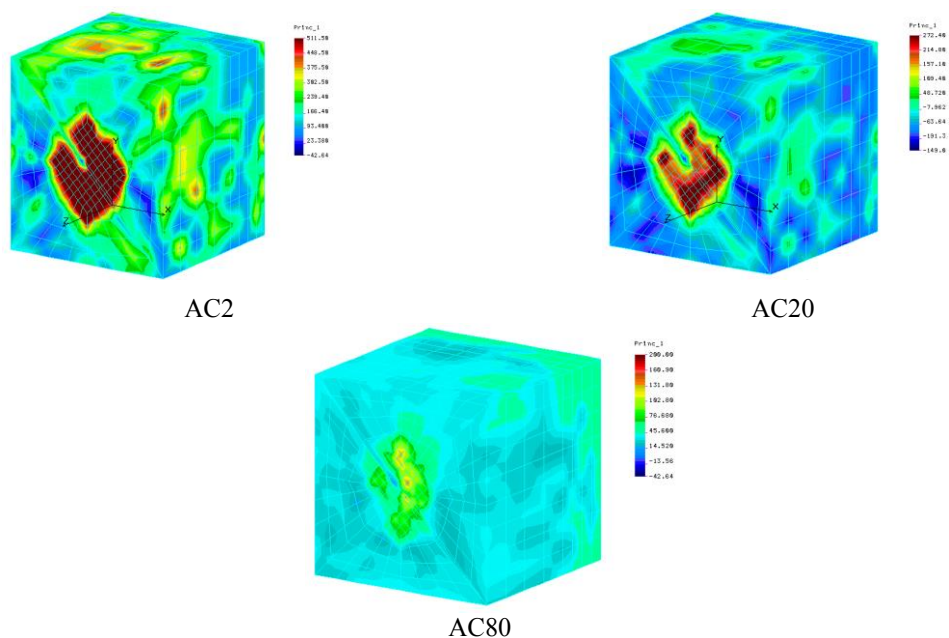


Рис. 3.10. Влияние марки алмазного зерна на главные напряжения в системе «алмазное зерно–связка»: зернистость 200/160, связка M2-09

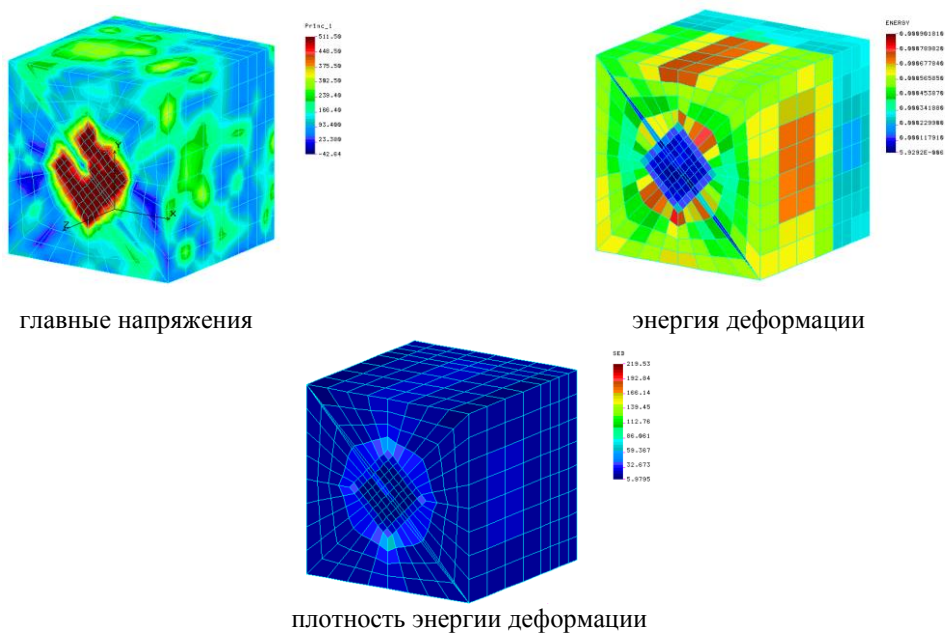


Рис. 3.11. Показатели 3D НДС системы «алмазное зерно–связка»: AC6 63/50 M1-01

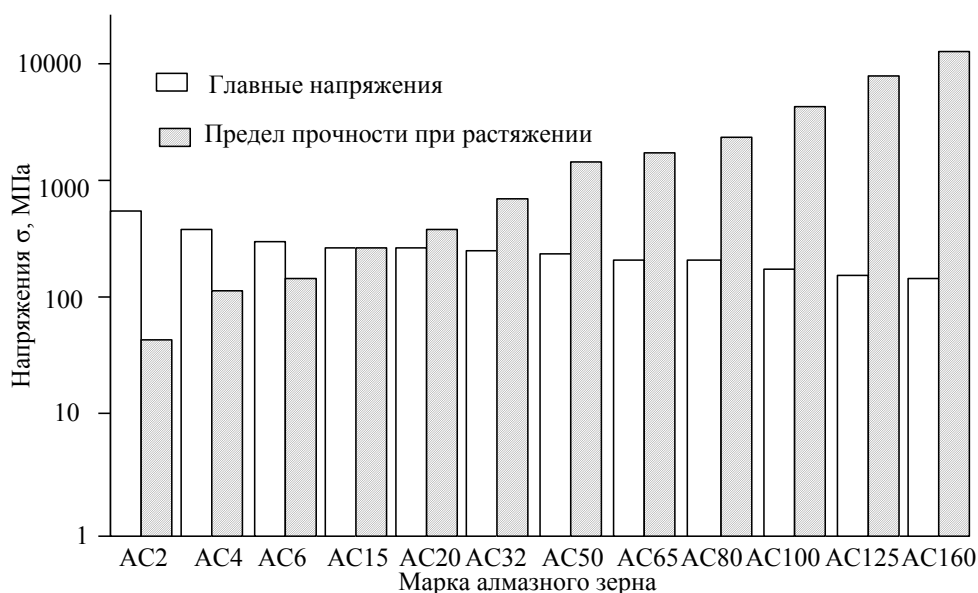


Рис. 3.12. Гистограмма расчетных главных напряжений и предела прочности при растяжении для различных марок алмаза

### 3.3. Влияние размера и концентрации алмазных зерен на их целостность при спекании

Размер зерен оказывает влияние на их целостность, главным образом, через показатель прочности. Установлено, что прочность зерен порошков при статическом сжатии в пределах данной марки растет с увеличением размера, т.е. порошки более крупных зернистостей могут выдерживать большую статическую нагрузку до разрушения [8, 9, 10]. Однако предел прочности при одноосном статическом сжатии в значительной степени зависит от размера кристалла алмаза: с его увеличением предел прочности резко уменьшается [18]. Подобную зависимость от размера зерна имеет и предел его прочности при растяжении (см. табл. 3.2), с которым сравнивались расчетные напряжения. Как показал анализ литературы (см. гл. 1), прочность синтетического алмаза уменьшается в десятки раз с увеличением количества включений, а поскольку увеличение размера зерна в пределах одной и той же марки связано с увеличением размеров включений в нем, то наряду со снижением предела прочности следует ожидать и роста напряжений в зерне.

**Примечание [G273]:** Стр: 106  
Синтетические сверхтвердые материалы: В 3-х т. Т. 1. Синтез сверхтвердых материалов / Редкол.: Новиков Н.В. (отв. ред.) и др. – Киев: Наук. думка, 1986. – 280 с.

**Примечание [G274]:** Стр: 106  
Ардамацкий А.Л. Алмазная обработка оптических деталей. – Л: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978. – 232 с.

**Примечание [G275]:** Стр: 106  
ДСТУ 3292-95

**Примечание [G276]:** Стр: 106  
Шульженко А.А. Определение предела прочности синтетических алмазов при сжатии // Синтетические алмазы. – 1969. - № 6. – С. 27-31

Все расчеты, в которых варьировались размеры спекаемых алмазных зерен, показывают, что НДС алмазов более крупных зернистостей характеризуется не только несколько большими величинами возникающих напряжений, но и большим объемом их распространения. Так для зерна AC32 при спекании в композиции со связкой М6-16 максимальные приведенные напряжения для зернистости 63/50 в 4 раза меньше, чем для зернистости 160/125, и почти в 10 раз меньше, чем для зернистости 500/400 (рис. 3.13).

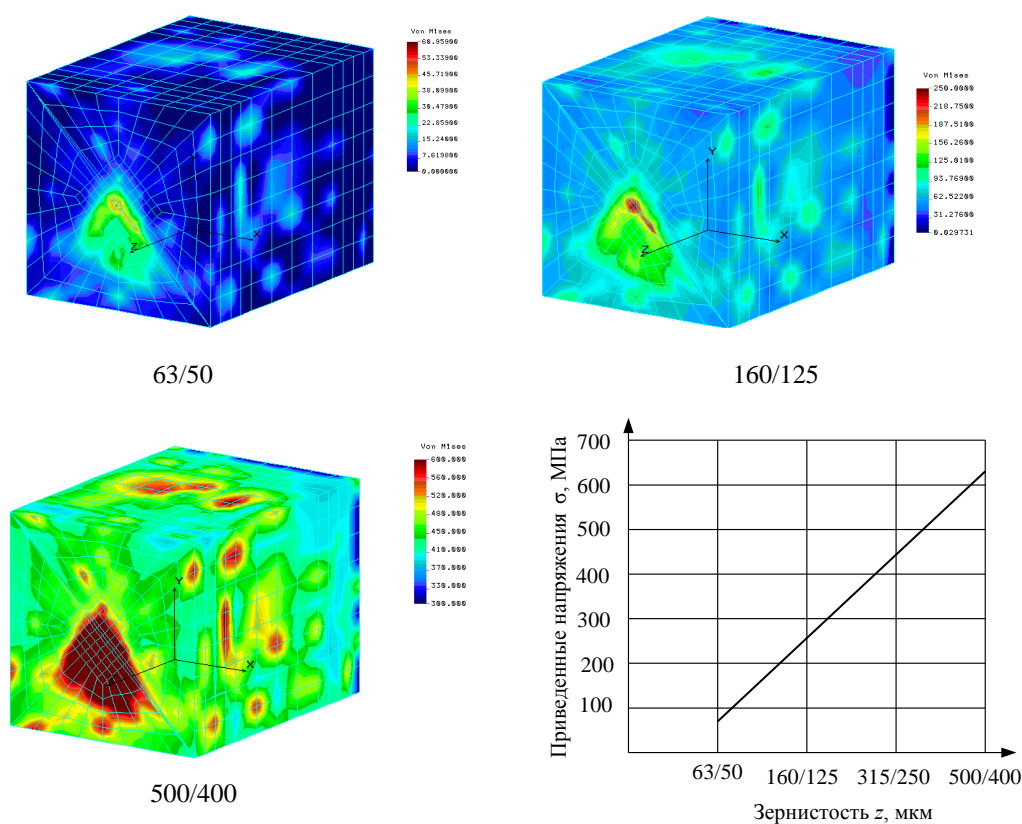


Рис. 3.13. Влияние зернистости на приведенные напряжения в системе «алмазное зерно связка»: AC32 – М6-16

Увеличение размера зерна, как правило, влечет за собой не только увеличение количества включений, но и большую неравномерность их распределения по объему зерна, что вызывает и более неравномерное напряженно-деформированное состояние алмазного зерна и тем самым больше способствует его разрушению (рис. 3.14).

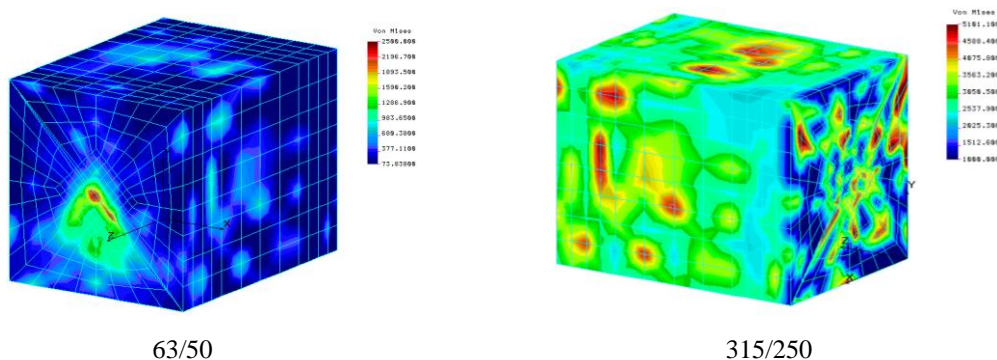


Рис. 3.14. Влияние неравномерности распределения включений в зерне AC20 на приведенные напряжения в алмазоносном слое на связке M2-01

Расчеты напряженно-деформированного состояния спекаемого алмазоносного слоя для различных зернистостей показывают, что для менее прочных марок лишь небольшие зернистости исключают разрушение зерен в процессе спекания. Так не разрушаются порошки AC2 зернистости 50/40 и 63/50, для AC4 – 50/40, 63/50, 125/100, для AC 50 – в диапазоне 50/40...250/200, а монокристаллические зерна алмаза марок от AC80 до AC160 остаются целыми во всем диапазоне исследуемых зернистостей.

Концентрация алмазных зерен в спекаемом алмазоносном слое влияет на напряженно-деформированное состояние его составляющих за счет изменения контактных напряжений в системе. Так в случае рассмотрения единичного зерна, спекаемого со связкой, НДС системы определяли только марка зерна, его размер, марка связки и соответствующие ей технологические режимы спекания. Когда же в модель включала два алмазных зерна, расстояние между которыми определялось задаваемой концентрацией, то поле напряжений одного зерна, обусловленное вышеперечисленными факторами, накладывалось на поле напряжений соседнего. Усиливались и напряжения в связке, которые, в свою очередь, интенсифицировали напряжения в зернах.

На рис. 3.15 представлены расчетные схемы плоскости XOY исследования влияния концентрации и поля главных напряжений в алмазных зернах AC15 125/100, возникающие в отдельном единичном зерне и при их спекании с 5 % концентрацией в связке M1-04. Величины и характер распределения главных напряжений в зерне практически аналогичны соответствующим

щим характеристикам в расчетах для единичного зерна: поскольку концентрация слишком мала, то контактные напряжения, возникающие при наложении полей от соседних зерен, весьма незначительны. Максимальные напряжения располагаются практически по всему контуру зерна вокруг области металлических включений.

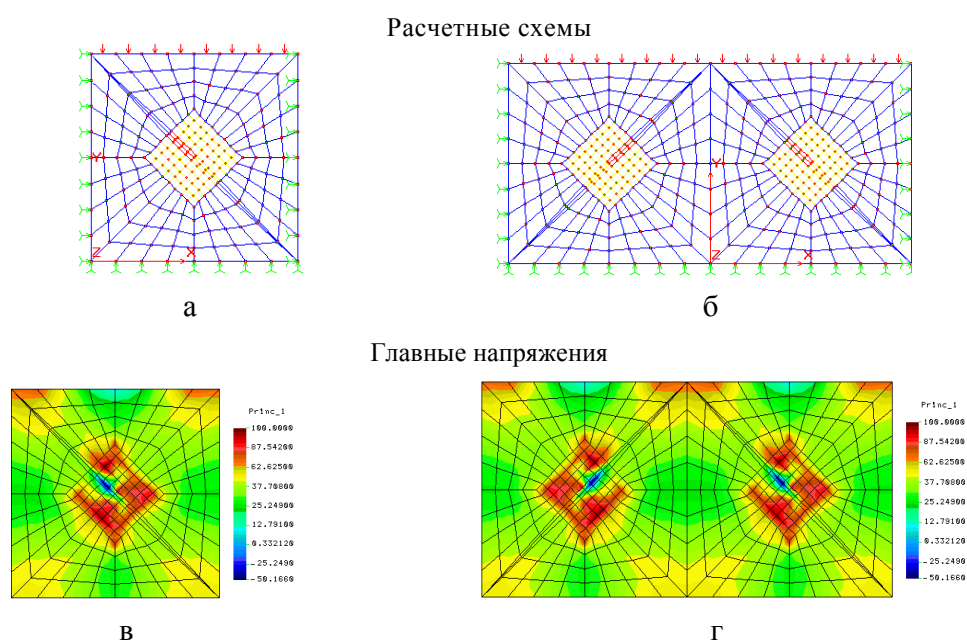


Рис. 3.15. Расчетные схемы и главные напряжения в системе «алмазное зерно–связка»: AC15 125/100 M1-04 для одного зерна (а, в) и 5% концентрации (б, г)

С ростом концентрации зона расположения максимальных напряжений в зерне несколько видоизменяется, значительно вытягиваясь вдоль оси октаэдра, моделирующего алмазное зерно. При малых (до 50 %) концентрациях значительные напряжения возникают лишь в центре зерна около включений и у его вершин. Затем по мере увеличения концентрации растут не только величины главных напряжений, но и занимаемое ими пространство в центре и около вершин октаэдра. Дальнейший рост концентрации алмазов в спеке приводит к постепенному соединению зон максимальных напряжений в единую область, протянувшуюся вдоль оси зерна и разрушающую его пополам при превышении их значений предела прочности на растяжение.



Физическим объяснением роста напряжений в системе при увеличении концентрации может быть увеличение модуля объемного сжатия алмазоносного слоя при его прессовании и горячей допрессовке. Чем больше упругих частиц алмаза находится в смеси, тем хуже ее сжимаемость, тем большую напряженность вызывает одно и то же прикладываемое давление при наличии других неизменных факторов, определяющих НДС системы «алмазное зерно–связка».

Некоторые отличия во влиянии концентрации алмазов в спеке на НДС системы наблюдается для разной зернистости, разных марок алмаза и особенно разных марок связок, что связано с особенностями влияния каждого из перечисленных факторов на НДС зоны спекания (рис. 3.16).

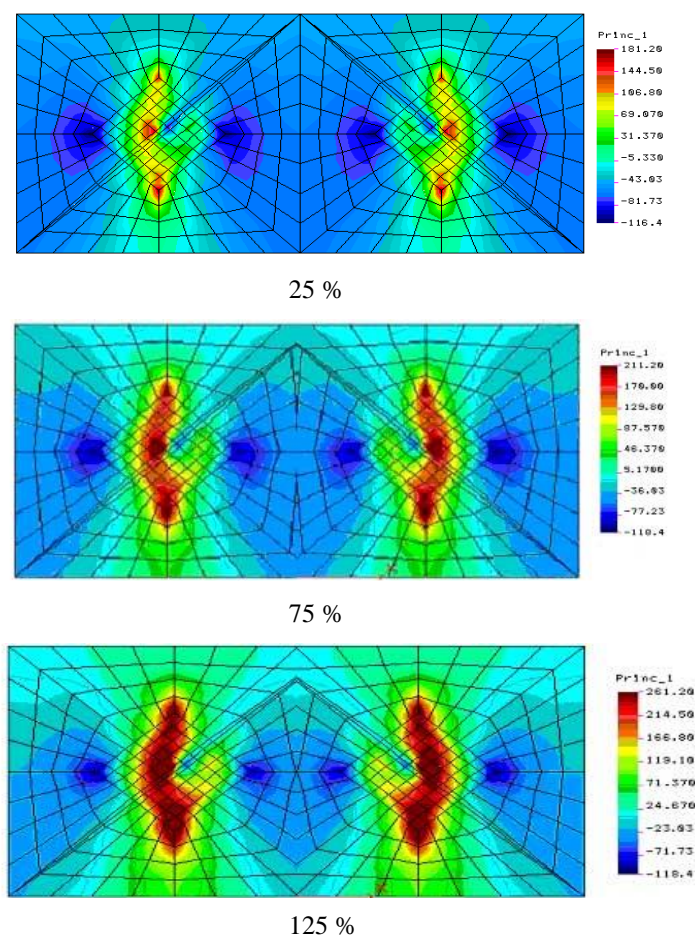
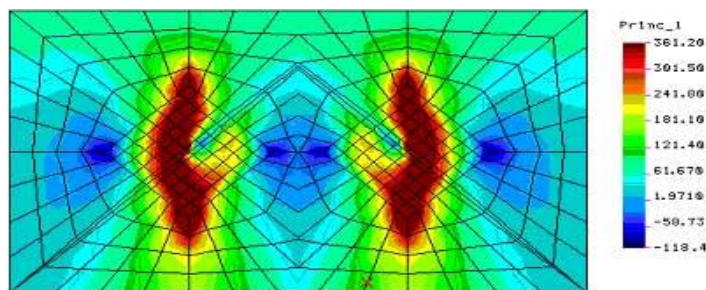


Рис. 3.16. Влияние концентрации алмазов на главные напряжения в системе «алмазное зерно–связка»: AC15 125/100 M1-04



175 %

Рис. 3.16. Влияние концентрации алмазов на главные напряжения в системе «алмазное зерно–связка» (продолжение): AC15 125/100 M1-04

Теоретическим пределом объемной концентрации при заполнении пространства шарами является величина  $\pi/\sqrt{18}$  [19]. Однако в работах В.Н. Бакуля экспериментально установлена величина максимального заполнения объема зернами алмаза – не более  $\pi/\sqrt{40} \approx 0.5$ . Проведенные расчеты показывают, что концентрация для большинства составов алмазоносного слоя на металлических связках должна быть даже меньше 0.25 (100 %) для того, чтобы зерна в спекаемом слое не разрушались. Чем прочнее зерна, тем большей может быть их концентрация в алмазоносном слое круга. Поскольку концентрация и зернистость взаимосвязаны, при назначении последней необходимо наряду с требованием обеспечения целостности зерен в процессе изготовления инструмента исходить из эксплуатационных требований к нему.

**Примечание [G277]:** Стр: 111  
Саати.Т. Целочисленные методы оптимизации и связанные с ними экстремальные проблемы. – М.: Мир, 1973. – 302с.

## Выводы

Установлено, что серийно выпускаемые алмазные круги на металлических связках имеют исходную дефектность в виде разрушенных в процессе спекания алмазных зерен, в результате чего количество зерен основной и крупной фракции уменьшается на 19–26 % и 4–7 % соответственно.

Впервые примененная к процессу спекания алмазоносного слоя шлифовального круга методика 3D моделирования напряженно-деформированного состояния позволила проанализировать НДС системы «алмазное зерно–связка» в зависимости от технологических режимов спекания, марки металлической связки, марки алмазных зерен, их концентрации и зернистости. Для повышения



точности теоретических расчетов алмазное зерно моделировали с учетом наличия в нем металлических включений, присутствующих в реальном зерне после его синтеза.

Расчеты 3D напряженно-деформированного состояния системы «алмазное зерно–металлическая связка» позволили выявить следующие тенденции увеличения степени повреждения зерен: с уменьшением прочности алмазных зерен; с ростом их зернистости; с ростом концентрации зерен; с увеличением прочности металлической связки; с увеличением численных значений режимов спекания, особенно температуры.

Для сохранения целостности зерен их концентрация должна быть снижена, до значений, определяемых прочностью зерна, модулем упругости связки и режимами их спекания. Уменьшение концентрации алмазных зерен в кругах на металлических связках с целью обеспечения их целостности является фактором снижения себестоимости данного вида инструмента.

Впервые на основе 3D моделирования напряженно-деформированного состояния зоны спекания установлены научно обоснованные рекомендации (табл. 3.3) по оптимальным составам спекаемых композиций – марка металлической связки, марка алмазного зерна, его зернистость и концентрация, обеспечивающим целостность зерен в процессе его изготовления.

Таблица 3.3 – Рекомендуемые составы алмазно-металлических композиций, обеспечивающие целостность зерен при спекании

Марка зерна	Модуль упругости связки, ГПа	Зернистость, мкм	Концентрация, %
AC2	40–52	50/40–63/50	5–7
AC4	44–70	50/40–80/63	5–10
AC6	77–95	50/40–100/80	10–16
AC15	86–100	80/63–100/80	15–21
AC32	98–110	80/63–125/100	18–25
AC50	102–119	100/80–160/125	25–28
AC80	143–173	125/100–250/200	25–34
AC100	165–210	125/100–315/250	30–37
AC125	190–260	200/160–315/250	30–40
AC160	210–320	250/200–500/400	35–45

## Глава 4

### **Процесс приспособляемости при алмазном шлифовании**

В главе приведен анализ процесса алмазного шлифования с позиций приспособляемости двух существенно различных по топографии поверхностей: дискретной рабочей поверхности круга (РПК) и квазисплошной обрабатываемой поверхности сверхтвёрдого материала (СТМ). Определена роль основных составляющих процесса приспособляемости: топографической, структурно-фазовой и энергетической в трех основных ее этапах. Излагаются причины влияния составляющих приспособляемости при традиционном алмазном шлифовании СТМ кругами на металлические связки на выходные показатели процесса обработки, обсуждается определяющая роль относительной величины фактической площади контакта элементов системы «РПК–СТМ» в эффективности процесса алмазного шлифования, влияние анизотропии физико-механических свойств СТМ и алмазных зерен на процесс приспособляемости. Приведена разработанная систематика составляющих процесса приспособляемости. Развито положение о возможности инверсии процесса приспособляемости и на этой основе выдвинута гипотеза о высоком потенциале управления приспособляемостью с целью использования положительных эффектов всего ее диапазона для повышения эффективности процесса алмазного шлифования СТМ.

#### **4.1. Анализ алмазного шлифования с позиций представлений о приспособляемости двух взаимодействующих поверхностей**

Принципиальная особенность процесса алмазного шлифования сверхтвёрдых материалов (СТМ) заключается в том, что контактируют равнотвёрдые материалы с предельно высокими значениями твердости и энергии межатомной связи, обладающие существенной анизотропией физико-механических свойств,

присущей алмазным структурам, при этом один из них (алмазные зерна) находится в упругой среде (металлической связке). В исходном состоянии одна из поверхностей (СТМ) квазисплошная, другая – рабочая поверхность круга – дискретная, параметры которой определяются количеством, размерами и состоянием алмазных зерен.

Эффективность любого процесса абразивной обработки определяется уровнем приспособляемости взаимодействующих поверхностей и возможностями изменения этого уровня за счет выбора условий шлифования (режимы обработки, введение в зону шлифования дополнительной энергии или ПАВ и т. д.). При традиционном алмазном шлифовании СТМ кругами на металлических связках процесс приспособляемости реализуется аномально быстро (1–2 минуты) [165]. Пути повышения эффективности данного процесса, в конечном счете, сводятся к регулированию интенсивности процесса приспособляемости, так как она определяет и производительность обработки, и ее качество, и интенсивность износа рабочей поверхности инструмента.

В отличие от классической теории резания в случае шлифования СТМ нет 1.5–2 кратного превышения твердости инструментального материала над обрабатываемым, нет внедрения алмазных зерен в обрабатываемый СТМ, нет четкого понятия толщины среза, а взаимодействующие материалы к тому же имеют предельную в природе твердость, присущую алмазным структурам. Эффективность процесса будет определяться характером и интенсивностью взаимного разрушения элементов системы «СТМ–зерно–связка» [165].

По мнению Б. И. Костецкого [85, 86, 88] разработка теории поверхностной прочности и разрушения тесно связана с развитием представлений об универсальном явлении – структурной приспособляемости материалов при контактом нагружении и ее инверсии, открытого в результате большого комплекса исследований и обобщения опыта промышленности. Это фундаментальное явление обусловлено энергетической целесообразностью перестройки исходной структуры поверхностных слоев материалов в устойчивую форму, энергетически наиболее выгодную для данных условий нагружения [72, 86, 88]. При этом энергетические затраты на трение минимизируются, а удельная энергоемкость разрушения (износа) единицы объема материала поверхностного слоя достигают максимума. Перестройка структуры материала поверхностного слоя осуществляется путем перехода к ультрадисперсному тонкопленочному высокопрочному и устойчивому по отношению к физико-химическим воздействиям состоянию [72, 88]. Формируется особая топография поверхности с ультрама-

**Примечание [V278]:** Стр: 114  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоровский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 03/09/02 Time 16:07:21}

**Примечание [V279]:** Стр: 114  
[a№3155] Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении. - Киев.: Техніка, 1976. - 232 с. {Book: Date 03/09/02 Time 16:05:48}

**Примечание [V280]:** Стр: 114  
[a№3038] Костецкий Б.И. Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении // Трение и износ. - 1985. Том IV. - № 2. - С. 201-207. {Book: Date 03/09/02 Time 16:06:19}

**Примечание [V281]:** Стр: 114  
[a№3171] Костецкий Б.И., Татансон М.Э., Бершадский Л.И. Механо-химические процессы при граничном трении. М.: Машиностроение, 1972. - 178 с. {Book: Date 03/09/02 Time 16:06:44}

**Примечание [V282]:** Стр: 114  
[a№3038] Костецкий Б.И. Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении // Трение и износ. - 1985. Том IV. - № 2. - С. 201-207. {Book: Date 03/09/02 Time 16:07:55}

**Примечание [V283]:** Стр: 114  
[a№3171] Костецкий Б.И., Татансон М.Э., Бершадский Л.И. Механо-химические процессы при граничном трении. М.: Машиностроение, 1972. - 178 с. {Book: Date 03/09/02 Time 16:08:24}

**Примечание [V284]:** Стр: 114  
[a№3037] Костецкий Б.И., Шульман А.П., Ляшко В.А., Носовский И.Г. Инверсия структурной приспособляемости в процессах финишной алмазной обработки // Синтетические алмазы - ключ к техническому прогрессу. - Киев. - 1977. Ч.1. - С. 273-279. {Book: Date 03/09/02 Time 16:08:47}

**Примечание [V285]:** Стр: 114  
[a№3171] Костецкий Б.И., Татансон М.Э., Бершадский Л.И. Механо-химические процессы при граничном трении. М.: Машиностроение, 1972. - 178 с. {Book: Date 03/09/02 Time 16:08:24}

**Примечание [V286]:** Стр: 114  
[a№3037] Костецкий Б.И., Шульман А.П., Ляшко В.А., Носовский И.Г. Инверсия структурной приспособляемости в процессах финишной алмазной обработки // Синтетические алмазы - ключ к техническому прогрессу. - Киев. - 1977. Ч.1. - С. 273-279. {Book: Date 03/09/02 Time 16:08:47}

лыми размерами субмикронеровностей. Независимо от исходного рельефа, микрогеометрия приработанной поверхности оптимизируется, при одинаковых условиях устанавливается одинаковая (равновесная) шероховатость. Б. И. Костецкий подчеркивает [85], что устойчивое динамическое состояние износостойкости и антифрикционности (фрикционности) реализуются только при условии динамического равновесия и саморегулирования составляющих процессов и соблюдения общих энергетических соотношений:

$$\int_0^V \frac{\Delta E(V)}{A} dV = \min ; \quad (4.1)$$

$$\frac{A}{I} = \max , \quad (4.2)$$

где  $\Delta E$  – изменение поглощенной энергии;

$A$  – работа сил трения;

$V$  – объем материала;

$I$  – величина износа.

Именно в этом случае вторичные структуры, возникающие в процессе структурной приспособляемости, концентрируют в себе всю запасенную энергию и тем самым экранируют основной материал твердых тел от механических воздействий (в нашем случае, это может быть графит, выполняющий роль твердой смазки), что и является причиной их максимальной прочности.

Таким образом, обобщая и развивая положение Б. И. Костецкого, понятие приспособляемости нами сформулировано как способность технической системы «СТМ–зерно–связка» приобретать в процессе эволюции свойства, обеспечивающие стабильность ее функционирования, которые обычно характеризуются минимумом энергетических затрат. Приспособляемость – способность к самоорганизации технической системы в процессе функционирования. Она реализуется при изменении свойств элементов системы или окружающей среды. Применительно к предметной области алмазно-абразивной обработки СТМ критерием самоорганизации может служить минимизация энергозатрат функционирования системы.

В качестве основных аспектов приспособляемости рассмотрены такие ее составляющие: топографическая, структурно-фазовая и энергетическая.

*Топографическая приспособляемость* включает аспекты изменения геометрических характеристик (параметров) поверхностей элементов системы «РПК – СТМ». В этом случае теоретически и экспериментально исследовали

**Примечание [V287]:** Стр: 115  
[a№3155] Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении. - Киев.: Техніка, 1976. - 232 с. {Book: Date 03/09/02 Time 16:09:42}

изменения 3D параметров топографии рабочей поверхности круга (РПК) и СТМ и их влияние на эффективность алмазного шлифования.

*Структурно-фазовая приспособляемость* включает аспекты, связанные с образованием мелкодисперсных вторичных структур, изменением физико-механических свойств поверхностных слоев контактирующих элементов. Рассмотрены элементы структурно-фазовой приспособляемости, обусловленные: 1) анизотропией (микроанизотропией) свойств кристаллитов СТМ и алмазных зерен, проявляющейся в различной интенсивности износа «твердых» и «мягких» граней, и способствующей изменению их в контакте (исходная и эволюционная анизотропия); 2) миграцией металлофазы к зоне контакта, вызванной существенным различием коэффициентов термического расширения алмаза и металлофазы; 3) элементами анизотропной графитизации и окисления алмазных структур СТМ и зерен.

*Энергетическая приспособляемость* – отражает энергетические аспекты эволюции свойств системы с точки зрения минимизации энергии разрушения. Косвенно характеризуется силами резания, мощностью и удельной энергоемкостью шлифования. Энергетическая приспособляемость характеризуется также перераспределением подводимой в зону шлифования энергии между элементами системы «СТМ–зерно–связка» (см. гл. 5).

В области технических приложений приспособляемость позволяет решать две группы задач: обеспечение надежности и долговечности узлов трения при эксплуатации машин и разработку эффективных технологических процессов абразивной обработки. Использование рассматриваемого явления в направлении интенсификации поверхностного разрушения (финишная абразивная обработка) Б. И. Костецкий [72] назвал инверсией структурной приспособляемости, которая, по его мнению, может быть достигнута путем введения в зону шлифования поверхностно-активных веществ (ПАВ), либо изменением динамики нагружения. При этом поверхность инструмента должна находиться в условиях структурной приспособляемости. Поскольку при алмазном шлифовании СТМ применение ПАВ не может существенно влиять на процесс диспергирования припуска, управляющим фактором может быть изменение динамики нагружения системы «РПК–СТМ».

В отличие от тезиса Б. И. Костецкого [72] об инверсии финишной абразивной обработки в основном за счет воздействия на обрабатываемый материал нами в качестве основного объекта управления выбрана рабочая поверхность круга. Однако перспективным представляется управление процессом приспособ-

**Примечание [V288]:** Стр: 116  
[a№3037] Костецкий Б.И., Шульман А.П., Ляшко В.А., Носовский И.Г. Инверсия структурной приспособляемости в процессах финишной алмазной обработки // Синтетические алмазы - ключ к техническому прогрессу. - Киев. - 1977. Ч.1, - С. 273-279. {Book: Date 03/09/02 Time 16:10:14}

сабливаемости и за счет воздействия на обрабатываемую поверхность СТМ путем изменения условий динамического воздействия энергии ультразвука и использовании анизотропии свойств кристаллитов СТМ, влияя тем самым на изменение характера взаимодействия элементов системы «РПК–СТМ».

Введение энергии ультразвуковых колебаний в зону шлифования и в зону управления использовано при разработке способов управления процессом приспособляемости (см. гл. 7).

## 4.2. Систематика процесса приспособляемости

Процесс шлифования СТМ может осуществляться по двум принципиально различным типам взаимодействия РПК с СТМ – без контакта связки с обрабатываемым материалом и/или без него (рис. 4.1).

Ранее установлено, что алмазное шлифование СТМ по своей природе и выходным показателям очень близко к процессам трения и износа. С этих позиций рассматривали процесс шлифования Т. Н. Лоладзе., Г. В. Бокучава, Б. И. Костецкий, А. И. Грабченко, Ю. Г. Кабалдин, А. А. Сагарда, В. Н. Кашеев и др. Процесс алмазного шлифования СТМ кругами на металлических связках в полной мере соответствует классическим законам трения и износа (рис. 4.2, типы III и VII). Используемому процессу, как и процессам трения, присущи классические периоды – приработка – нормальный износ – катастрофический. Однако здесь последовательность этих периодов несколько иная. В традиционном процессе алмазного шлифования кругами на металлических связках первый этап – высокопроизводительный съем и износ зерен адекватны катастрофическому износу, который через переходный этап приработки самопроизвольно трансформируется в нормальный процесс истирания износостойкой пары «алмаз–алмаз», где ответственными за износ становятся термоактивируемые процессы.

Поэтому при определении величины относительной фактической площади контакта РПК с СТМ воспользуемся классическими закономерностями трибологии (см. гл. 6). На рис. 4.3 приведены экспериментальные зависимости основных показателей процесса традиционного алмазного шлифования СТМ кругами на металлических связках от времени обработки, полученные в работах А. И. Грабченко с сотрудниками [33]. На рис. 4.3 приведены и полученные нами результаты по изменению величины фактической площади контакта и со-

отношения «твердых» и «мягких» граней в контакте. На этих зависимостях можно выделить три этапа приспособляемости. Первый этап (после правки круга) – чрезвычайно интенсивного изменения всех показателей (соответствует катастрофическому износу в процессах трения), второй этап – переходной и третий – установившийся (соответствует периоду нормального износа в процессах трения), представляющий процесс трения износостойкой пары «алмаз–алмаз».

В соответствии с этим рассматривали три этапа приспособляемости при традиционном алмазном шлифовании СТМ кругами на металлических связках): высокоинтенсивный (I), переходной (II), устойчивый (III) (см. рис. 4.3).

На первом этапе и алмазные зерна и обрабатываемая поверхность СТМ подвергаются преимущественно хрупкому микроразрушению (рис. 4.4 а), на втором этапе процесс дополняется влиянием термоактивируемых процессов, в третьем преимущественную роль играют только термоактивируемые процессы. Характерным показателем этого периода является массовое образование на алмазных зернах площадок износа (рис. 4.4 б).

В эти периоды, практически в полной закономерной связи изменяются как параметры взаимодействующих поверхностей – фактическая площадь контакта, площадь контакта «твердых» граней кристаллитов СТМ и зерен, число зерен с площадками износа, шероховатость обработанной поверхности, рабочая (в нашем случае – наибольшая) высота выступания зерен из связки, так и выходные показатели процесса шлифования – производительность, удельный расход, удельный износ, коэффициент шлифования, удельная энергоемкость (см. рис. 4.3). При этом продолжительность этих периодов для различных марок СТМ различна (табл. 4.1).

Таблица 4.1 – Зависимость продолжительности периодов шлифования от марки СТМ

Обрабатываемый материал	Продолжительность периода, с		
	интенсивный	переходный	устойчивый
АСПК	до 20	20–50	св. 50
АСБ	35	35–90	св. 80
Диамет	40	40–80	св. 80
ДАП	50	50–100	св. 100
Эльбор-Р	170	170–240	св. 240
Гексанит-Р	210	210–270	св. 270
ДПНБ	250	250–300	св. 300



---

Общие условия: Круг 12A2-45 150×10×3×32 AC6 50/40 M6-14 4  $P_H = 2.0$  МПа;  
 $V_{кр} = 30$  м/с;  $S_{пр} = 1$  м/мин.

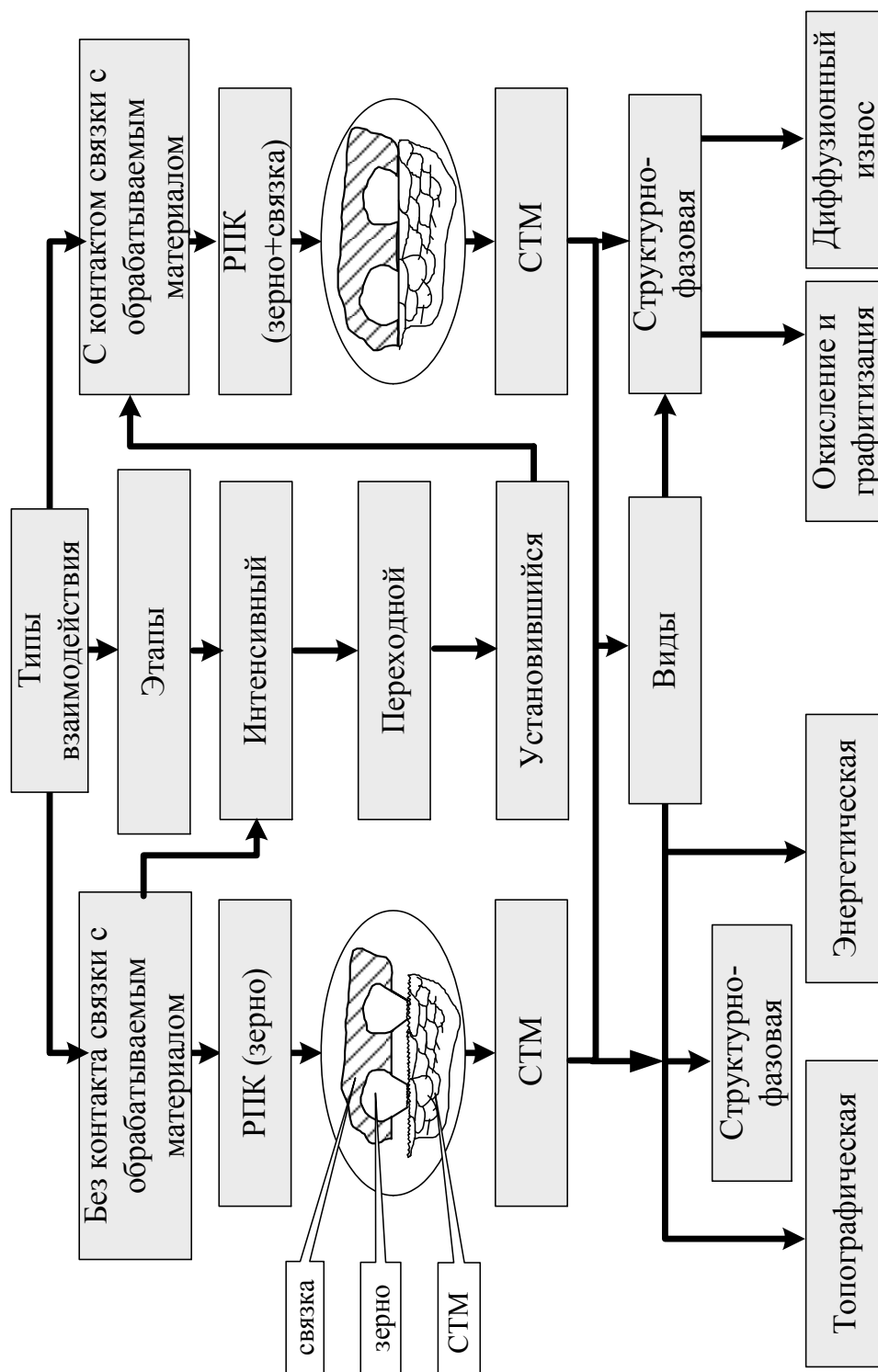


Рис. 4.1. Составляющие процесса приспособляемости

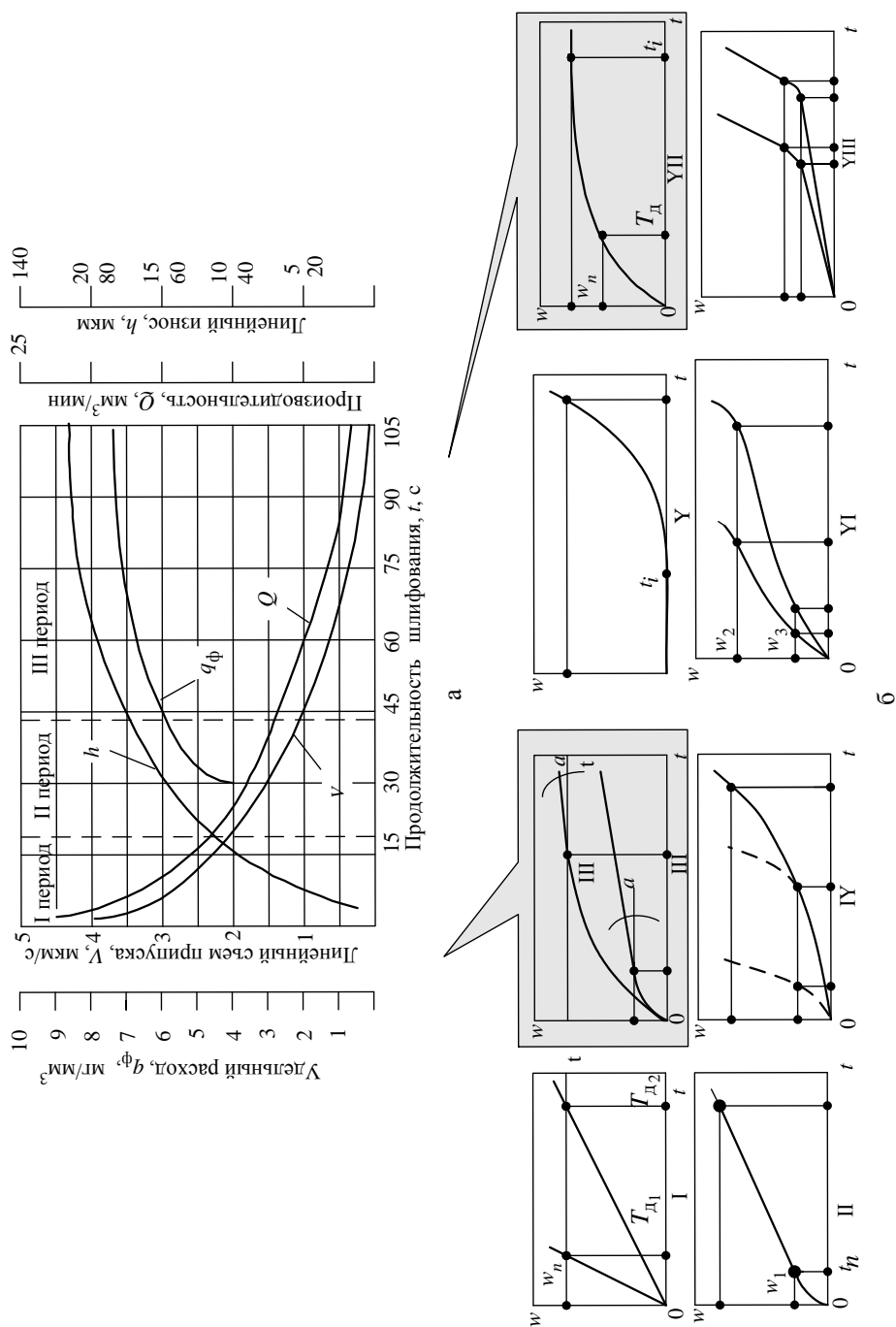
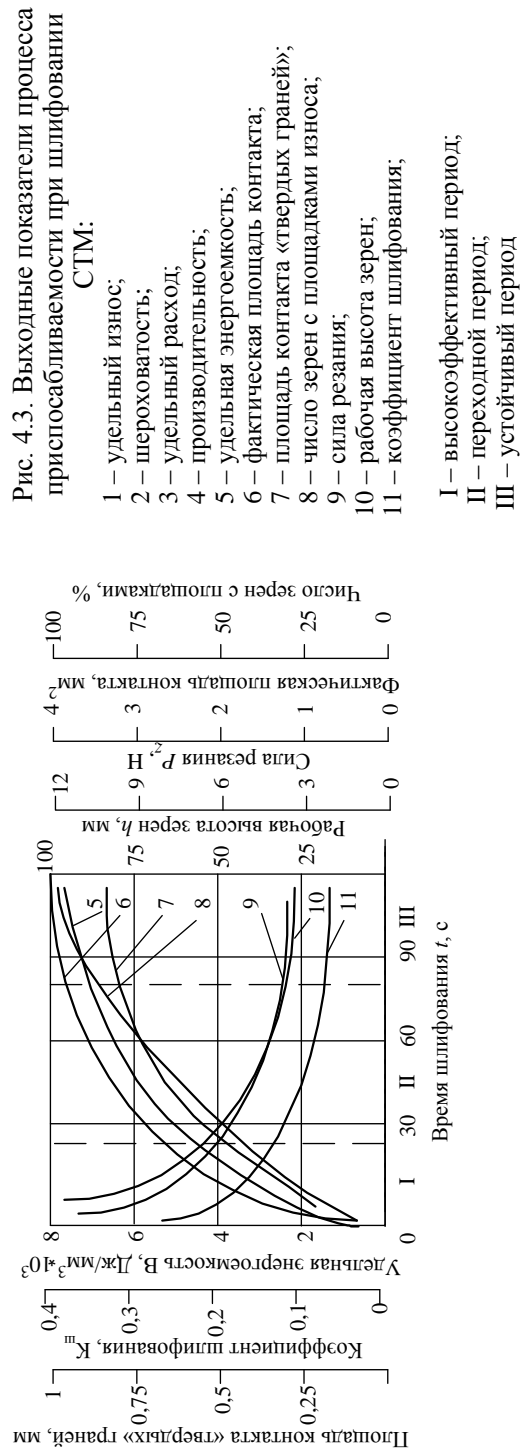
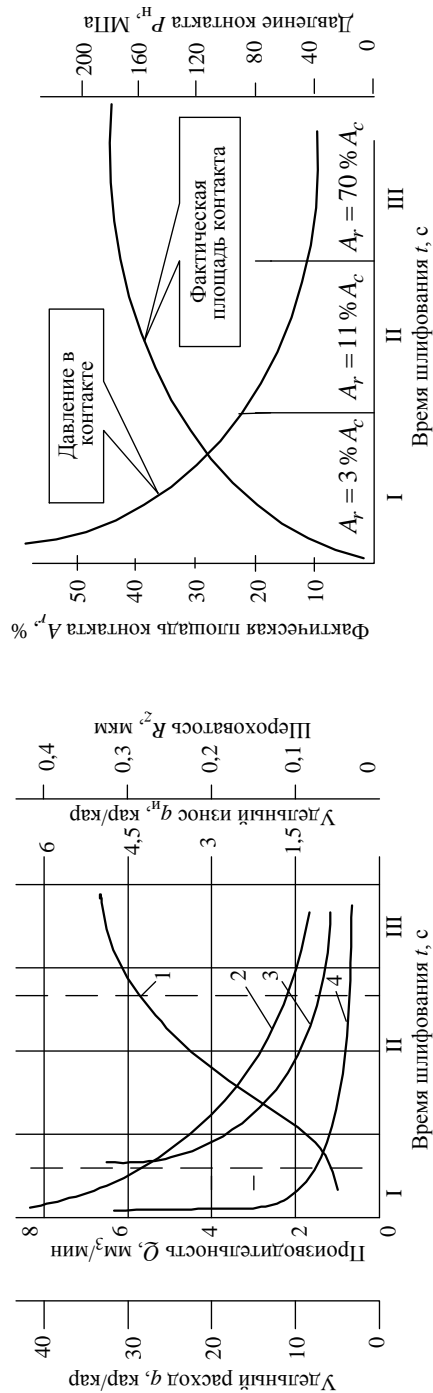
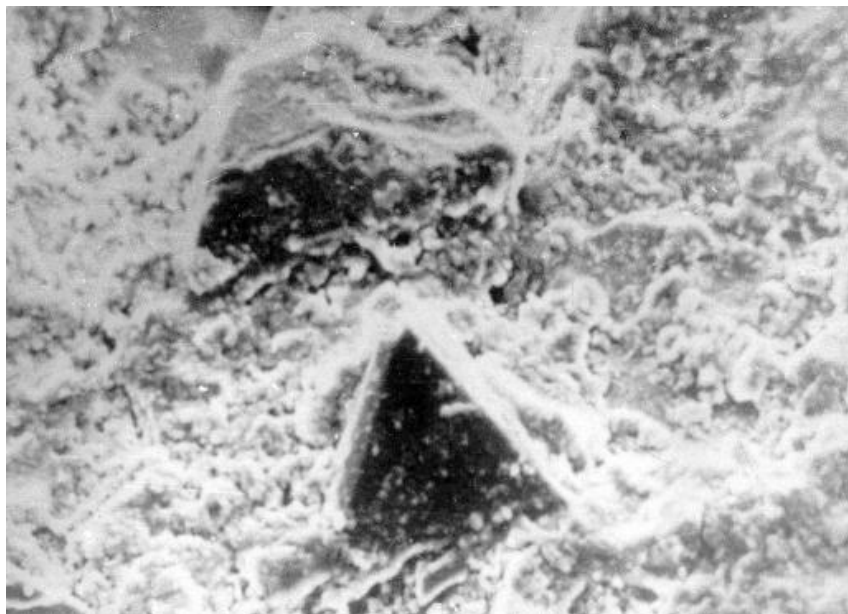


Рис. 4.2. Закономерности изнашивания деталей машин [52] и элементов системы «РПК–СТМ» при шлифовании:

а – закономерности изнашивания элементов системы «РПК–СТМ» при шлифовании;  
б – типовые графики динамики изнашивания деталей машин.

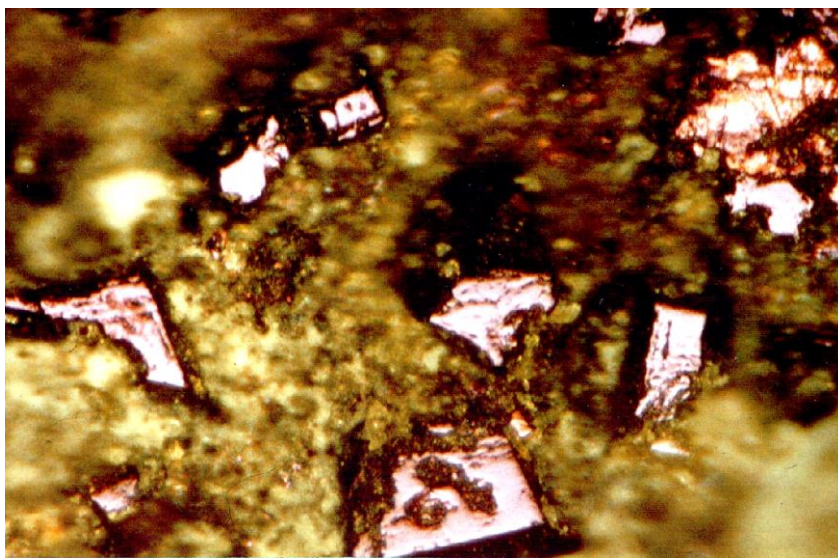
$K_T = H_M / H_a$ , где  $H_a$  – твердость абразива;  $H_M$  – твердость обрабатываемого материала.





× 300

а



× 500

б

Рис. 4.4. Микрофотографии поверхности алмазных зерен:  
а – после 5 с шлифования; б – после 120 с шлифования

Изменение всех этих параметров адекватно может быть описано зависимостью типа:  $A = K \cdot \tau^c$ , где  $A$  – показатель процесса приспособляемости;  $K$ ,  $c$  – коэффициент и показатель степени, зависящие от условий шлифования;  $\tau$  – время шлифования.

Такая синхронность изменения параметров приспособляемости взаимодействующих поверхностей и выходных показателей процесса алмазного шлифования СТМ даже при предварительном анализе позволяет судить об их тесной взаимосвязи и, как следствие, возможности управлять одними посредством других. Это положение было принято за основу разработки методологии процесса управления приспособляемостью (см. гл. 7).

Приспособляемость при алмазном шлифовании СТМ не может быть реалистично изучена при раздельном исследовании процесса износа алмазного круга и съема припуска в силу взаимовлияния явлений, происходящих как на поверхности круга, так и на поверхности СТМ. Поэтому процесс приспособляемости проанализирован при изучении поведения единой системы «СТМ–зерно–связка» в процессе шлифования с учетом изменения геометрических и физико-механических свойств ее элементов.

В качестве основных параметров приспособляемости, наиболее объективно характеризующих явления, происходящие в зоне шлифования, нами выбраны и проанализированы:

$B$  – удельная энергоемкость процесса,  $B = \frac{P_z V}{a}$ , Дж/мм<sup>3</sup>;

$K_{ш}$  – коэффициент шлифования,  $K_{ш} = \frac{P_z}{P_y}$ ;

$F = t_{ps} / C$ , где  $t_{ps}$  – относительная опорная площадь топографии рабочей поверхности круга;  $C$  – удельная длина микрополостей (дефектов, пор) на обработанной поверхности СТМ;

$A$  – относительная величина фактической площади контакта РПК с СТМ, %;

$L$  – относительная площадь в контакте «твердых» граней кристаллитов СТМ и алмазных зерен;

$D = t_{ps} / K$ , где  $K$  – удельное содержание металлофазы на поверхности СТМ;

$M = t_{ps} / Rz$ , где  $Rz$  – шероховатость поверхности СТМ;

$C = t_{ps1} / t_{ps}$ ,  $t_{ps1}$  – относительная опорная площадь поверхности СТМ;

$R$  – величина тока электризации в паре трения «РПК–СТМ».

Поскольку распределение зерен в связке, параметры режущего рельефа круга и обработанной поверхности СТМ носят случайный характер, для анализа взаимосвязи параметров приспособляемости с выходными показателями алмазного шлифования СТМ целесообразно применение методов математической статистики. В роли случайных величин рассмотрены выбранные параметры приспособляемости. В качестве фактора аргумента  $x$  принята производительность шлифования  $Q$  и шероховатость обработанной поверхности, характеризующаяся нами величиной относительной опорной площади поверхности СТМ  $t_{ps}$ .

В результате обработки экспериментальных данных, полученных при алмазном шлифовании ДАП кругом 12A2-45 150×10×3×32 AC6 50/40 M6-14 4 со скоростью  $V_{кр} = 30$  м/с, по упругой схеме шлифования с  $P_n = 2.0$  МПа,  $S_{пр} = 1$  м/мин, получены значения эмпирических корреляционных отношений, характеризующих тесноту связи между исследуемыми параметрами (табл. 4.2). Математическая обработка полученных данных производилась методом корреляционного анализа, позволяющего установить связь между показателями приспособляемости процесса обработки СТМ и выходными показателями процесса шлифования. Для выявления зависимости между функциональным фактором  $y$  и фактором-аргументом  $x$  были определены величины эмпирических корреляционных отношений.

Таблица 4.2 – Величины эмпирических корреляционных отношений

Эмпирическое корреляционное отношение	Параметры приспособляемости, $X$								
	$B$	$K_{ш}$	$F$	$D$	$V$	$A$	$L$	$C$	$R$
$\eta_{QX}$	0.972	0.628	0.548	0.432	0.982	0.987	0.734	0.726	0.926
$\eta_{RzX}$	0.871	0.732	0.632	0.524	0.997	0.988	0.883	0.834	0.949

Установлено, что наиболее тесная корреляционная связь наблюдается между производительностью шлифования и относительной величиной фактической площади контакта, а шероховатость обработанной поверхности наиболее тесно связана с относительной опорной площадью РПК. Установленная тесная корреляционная связь величины тока электризации в контакте «РПК–СТМ» позволяет использовать его в качестве контролируемого параметра приспособляемости, а также при разработке адаптивной системы управления (см. гл. 7).



Таким образом, аномально быстрое изменение удельной интенсивности алмазного шлифования СТМ при упругой схеме обработки определяется резким увеличением относительной фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ», резким уменьшением величины удельных нагрузок и, как следствие, – снижением удельной интенсивности шлифования (табл. 4.3).

Таблица 4.3 – Удельная интенсивность шлифования  $C_{уд}$ ,  $\text{мм}^3/\text{мин} \cdot \text{Н} \cdot 10^3$

Марка СТМ	Относительная величина фактической площади контакта в системе РПК – СТМ, %					
	0.1	1	7	25	45	60
АСПК	75	46	29	11	4	1
АСБ	125	79	51	21	8	1
ДАП	193	131	88	41	19	3
Эльбор-Р	912	718	506	453	438	311
Гексанит-Р	1102	620	406	292	210	121
Диамет	205	152	111	63	34	2
ДПНБ	1106	789	622	409	307	302

Общие условия: Круг 12А2-45 150×10×3×32 АС32 50/40 М6-14 4  $P_H = 2.0$  МПа;  $V_{кр} = 30$  м/с;  $S_{пр} = 1$  м/мин.

Относительная величина фактической площади контакта (далее – фактическая площадь контакта) принята в качестве основного топографического параметра приспособляемости. Интенсивное изменение всех выходных показателей связано с увеличением фактической площади контакта не только за счет износа зерен и образования на них площадок износа, а и за счет сглаживания шероховатости обработанной поверхности СТМ. По микрофотографиям рабочей поверхности круга и обработанной поверхности СТМ, снятым в различные периоды приспособляемости, можно отчетливо проследить синхронность их изменения с изменением величины фактической площади контакта в системе «РПК – СТМ» (рис. 4.5). Важнейшим показателем при этом будет являться относительная опорная площадь топографии РПК  $t_{p\text{РПК}}$  и обрабатываемого СТМ  $t_{p\text{СТМ}}$ , которая определялась методом лазерного сканирования (см. гл. 6). Увеличение  $t_{p\text{РПК}}$  и  $t_{p\text{СТМ}}$  приводит к росту фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ» и, как следствие, уменьшению давлений в контакте. Трансформация механизмов разрушения обусловлена существенным уменьшением контактных напряжений при образовании на зернах площадок износа.

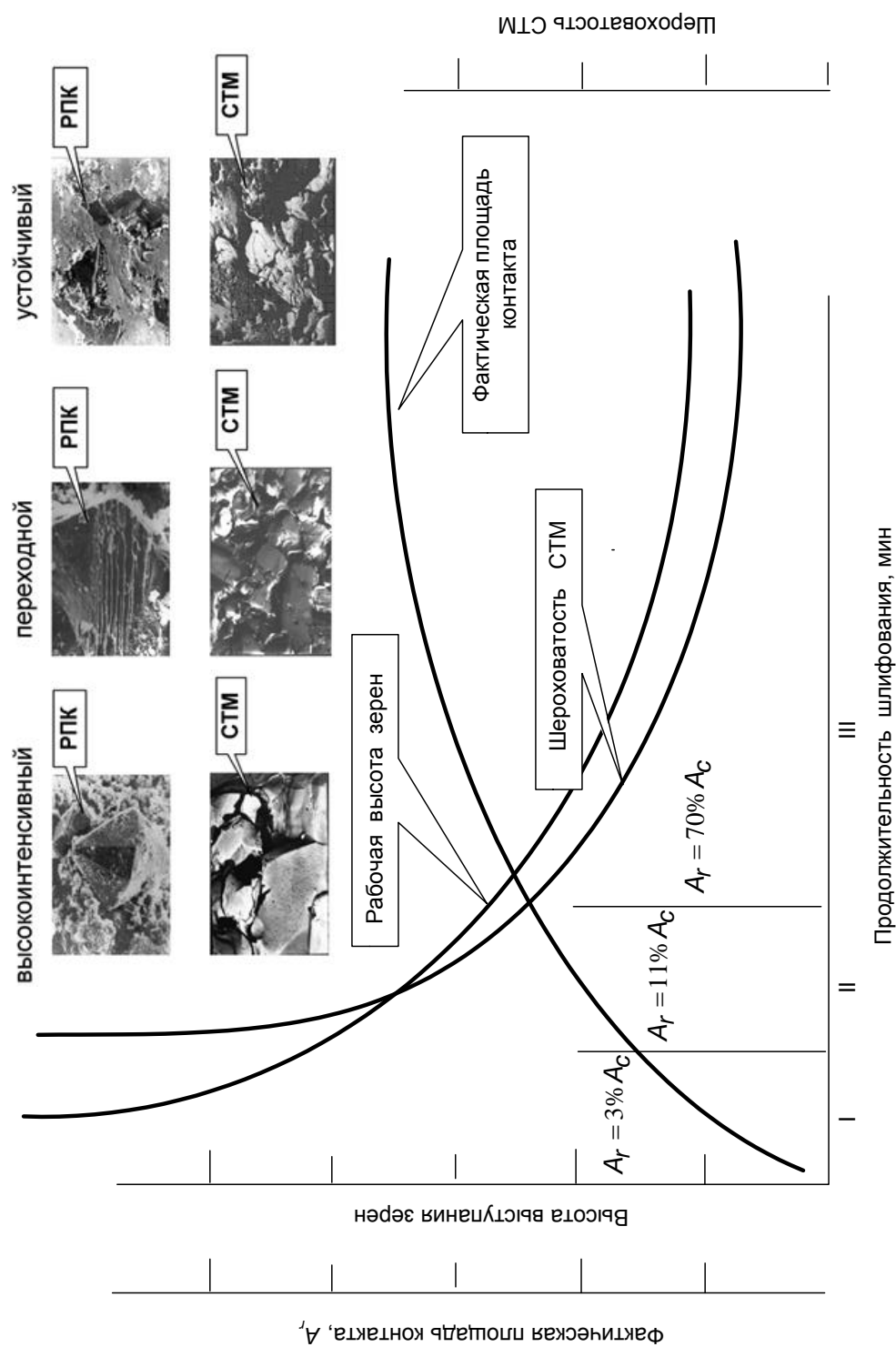


Рис. 4.5. Характерные периоды приспособляемости взаимодействующих поверхностей РПК и СТМ

Исследования 3D напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «СТМ–зерно–связка» показали, что образование площадок износа при одних и тех же условиях может в 5 – 10 раз уменьшить величину приведенных напряжений в контакте «РПК–СТМ». Так, при одних и тех же условиях нагружения системы образование площадок износа на алмазных зернах уменьшает величину приведенных напряжений даже в контакте острого зерна в 5 раз (рис. 4.6). При этом даже при увеличении поперечной подачи до  $S_{\text{поп}} = 5$  мкм/дв.ход напряжения в контакте «зерно – СТМ» не достигают критических, т. е. процесс съема припуска прекращается. Вместе с тем чрезмерно высокие суммарные давления на СТМ могут привести к макроразрушению (объемному растрескиванию) обрабатываемой поверхности, т. е. браку при обработке.

При отсутствии контакта связки с обрабатываемым СТМ при шлифовании по упругой схеме использование величины нормального давления  $P_n$  в традиционном понимании как отношения нагрузки в контакте  $P$  к номинальной площади контакта РПК с СТМ  $A_c$  т. е.  $P_n = \frac{P}{A_c}$  не корректно, так как в этом случае, например, при шлифовании ДАП фактическая площадь контакта по мере приспособляемости изменяется от 0.001 до 12 мм<sup>2</sup>, т. е. более чем в 10000 раз и, следовательно, фактические давления изменяются. Таким образом, для того, чтобы сохранить производительность, соответствующую первому этапу обработки, т. е. сохранить фактические давления на том же уровне, следует нагрузку в контакте «СТМ–РПК» увеличить в 10000 раз и при обработке, например, ДАП она должна составлять 100 кН, что естественно приведет к объемному разрушению СТМ (браку при обработке). Таким образом, для корректного использования упругой схемы шлифования в условиях отсутствия контакта связки с обрабатываемым материалом необходимо учитывать коэффициент изменения фактической площади контакта  $K$ , равный:

$$K = A_r / A_c = P_n / P_{\text{ф}},$$

где  $A_r$  – фактическая площадь контакта;  $A_c$  – номинальная площадь контакта;  $P_{\text{ф}}$  – фактическое нормальное давление в контакте «РПК–СТМ»,  $P_n$  – номинальное (задаваемое) давление.

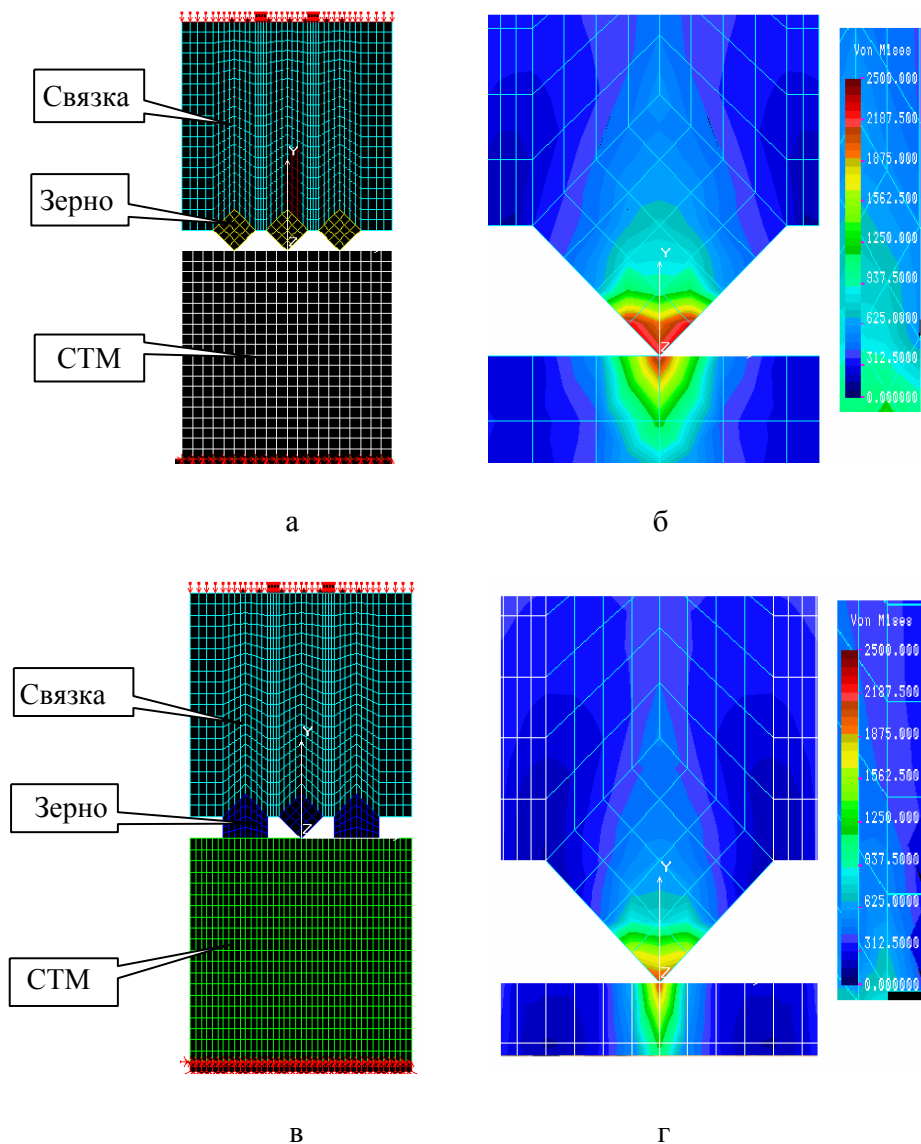


Рис. 4.6. Влияние зерен с площадками износа на НДС системы «СТМ–зерно–связка»: а, в – расчетная схема; б, г – приведенные напряжения в среднем зерне

Два типа взаимодействия элементов системы «РПК–СТМ» являются отличительной особенностью процесса шлифования в условиях контактирования равнотвердых материалов, когда практически отсутствует внедрение алмазных зерен в обрабатываемый материал (см. рис. 4.1). Этим двум типам взаимодействия элементов системы «РПК–СТМ» соответствуют принципиально различ-

ные аспекты процесса приспособляемости. Так, для первого типа это преимущественно процессы хрупкого микроразрушения алмазных зерен и припуска обрабатываемого СТМ, а для второго – это преимущественно термоактивируемые процессы. У каждого типа есть свои достоинства и недостатки. В первом случае обеспечивается высокая производительность процесса, однако, он сопровождается и высоким удельным износом алмазных зерен. Шероховатость обработанной поверхности в этом случае не соответствует требованиям к поверхностям, например, лезвийного инструмента из СТМ, т. е. требуется дополнительная операция доводки. Второй тип характеризуется высокой размерной стойкостью круга, что делает его потенциально пригодным для прецизионных и ультрапрецизионных процессов шлифования. При этом можно предположить, что этот период обработки можно использовать в качестве доводочного процесса. Такая гипотеза обоснована и реализована в гл. 8.

Мнение авторов [165] о том, что определяющим параметром является рабочая высота зерен, требует уточнения. В гл. 6 доказано, что при всех прочих равных условиях (зернистость, концентрация, марка зерна, режимы шлифования), при одной и той же рабочей высоте зерен на разных связках (различной критической величине заделки зерен) величина фактической площади контакта может быть разной. Эффективность процесса шлифования определяется относительной величиной фактической площади контакта РПК–СТМ, которая в свою очередь зависит от рабочей высоты зерен на РПК, степени алмазоудержания, упругого (а иногда и пластического) вдавливания зерен в связку.

Анализ этих взаимосвязей проведен при изучении процессов микроразрушения элементов системы «СТМ–зерно–связка» (см. гл. 5).

Изучение процесса приспособляемости базировали на комплексном теоретическом и экспериментальном одновременном изучении изменения 3D параметров рабочей поверхности круга и обработанной поверхности СТМ и исследовании соответствующего изменения 3D напряженно-деформированного состояния единой системы «СТМ–зерно–связка». Такой подход позволил в условиях, максимально приближенных к реальным, изучить в трехмерном измерении поведение зоны шлифования в процессе обработки, в том числе более глубоко изучить процесс приспособляемости с учетом, например, таких взаимосвязей как: 1) влияние физико-механических свойств связки на величину напряжений в контакте «зерно–СТМ» и, как следствие, на интенсивность съема припуска и износа зерен; 2) влияние физико-механических свойств обрабатываемого материала на величину критической заделки алмазных зерен в связке и,

**Примечание [V289]:** Стр: 129  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И.,  
Ходоровский М.Г. Алмазное шлифова-  
ние синтетических сверхтвердых мате-  
риалов. - Харьков: Вища школа, 1980. -  
192 с. {Book: Date 03/09/02 Time  
16:12:06}

следовательно, на величину удельного расхода; 3) взаимовлияние физико-механических свойств обрабатываемого материала, алмазных зерен и связки на величину их напряженно-деформированного состояния и их оптимальное сочетание.

С учетом изложенных выше особенностей развития приспособляемости в системе «алмазный круг–шлифуемый СТМ» представляется целесообразным и возможным повышать эффективность алмазного шлифования не только за счет осуществления инверсии процесса приспособляемости, но и управления ею во всем диапазоне. Выдвинута доказательная гипотеза о возможности управления процессом приспособляемости для эффективного использования достоинства каждого его этапа и всего диапазона. В соответствии с предложенной систематикой процесса приспособляемости резервы повышения эффективности алмазного шлифования СТМ найдены в использовании положительных эффектов каждого типа взаимодействия элементов системы РПК–СТМ. Для этого изучена трансформация механизмов разрушения элементов системы «СТМ–зерно–связка» в процессе приспособляемости.

#### 4.3. Трансформация механизмов разрушения в процессе приспособляемости

Природа износа алмазных зерен при микрорезании и в условиях шлифования исследовалась во многих работах [12, 66, 172, 176]. Выявлен механический, адгезионный, адгезионно-усталостный, диффузионный, абразивный износ и графитизация алмазов (табл. 4.4). Высокая интенсивность адгезионного износа наблюдается при контактировании с материалами, содержащими в своем составе Ni, Ti, Mo, Fe и другие адгезионно-активные материалы. Обладающие меньшим химическим сродством с алмазом материалы – твердые сплавы, керамика, ферриты, полупроводники, стекло – изнашивают алмазные зерна путем микровыкрашивания как результат механического и адгезионно-усталостного воздействия. Механический износ преобладает при шлифовании цветных металлов и сплавов – меди, латуни, бронзы, алюминия, а также горных пород и минералов – мрамора, кварца, гранита. При высоких температурах шлифования возможно окисление, графитизация и диффузия атомов углерода, например, в железоуглеродистые материалы. Преобладающий вид взаимного микроразрушения элементов системы «СТМ – зерно – связка» определяется относительной

**Примечание [V290]:** Стр: 130  
[a№582] Беззубенко Н.К., Евдокимов А.Е. Напряжения, возникающие при микрорезании // Резание и инструм. - 1990. - № 43. - с. 56-63. {Book: Date 03/09/02 Time 16:13:50}

**Примечание [V291]:** Стр: 130  
[a№819] Износостойкость алмазных зерен при микрорезании титанового сплава BT8 / Н.И. Богомолов, Н.В. Есаулов, Г.И. Саотин, В.Г. Саськов // Сверхтвердые материалы. - 1980. - № 4 с. 43-44. {Book: Date 03/09/02 Time 16:12:36}

**Примечание [V292]:** Стр: 130  
[a№590] Скрябин В.А., Лемин В.А. Моделирование процесса субмикрорезания при обработке деталей закрепленным абразивом // Изв. вузов. Машиностр. - 1989. - № 12. - с. 118-122. {Book: Date 03/09/02 Time 16:13:23}

**Примечание [V293]:** Стр: 130  
[a№581] Таратыпов О.В. Особенности микрорезания при суперфинишировании // Технол. и пр-во деталей автомоб. техн. - М, 1990. - с. 50-59. {Book: Date 03/09/02 Time 16:14:15}

величиной фактической площади контакта (см. рис. 4.5). Эта особенность использована при разработке процесса термоактивируемой доводки (см. гл. 7).

Таблица 4.4 – Виды износа взаимодействующих поверхностей в зоне шлифования

Фактор	Обрабатываемый материал	Характер износа алмазного зерна
Адгезионно-усталостные явления	Минералокерамика ЦМ-332, твердый сплав Т15К6	Сетка микротрещин, выкалывание отдельных блоков мозаики
Адгезия	Жаропрочные сплавы ХН 70ВМТЮ, ХН7 Титан и его сплавы Молибден и его сплавы  Железоуглеродистые сплавы	Кратеры на поверхности зерна глубиной $(2-3)10^{-6}$ м Налипы $100 \cdot 10^{-6}$ м Кратеры значительных размеров Бугристая поверхность при скорости до 1.4 м/с
Диффузия углерода в обрабатываемый материал	То же  Никель, кобальт, хром, титан	Гладкая блестящая площадка при скорости свыше 1.4 м/с Образование и отрыв пленки карбидов с поверхности алмаза
Графитизации	Железо	Гладкая поверхность
Хрупкое микрокалывание	Синтетические сверхтвердые поликристаллы на основе алмаза Алмаз природный	Площадки износа, последующее их сглаживание  Выколы в форме ромбов и квадратов

Степень размерной стойкости круга, определяющая прецизионность алмазного шлифования СТМ, во многом определяется интенсивностью износа алмазных зерен круга.

Для линейного износа алмазных кругов на металлических связках в различных условиях шлифования СТМ на основе алмаза характерна аномально высокая интенсивность в первые минуты шлифования. Затем износ уменьшается и через 60 ... 150 с практически прекращается (см. рис. 4.3, 4.5) Износ при этом происходит только в пределах одного слоя выступающих из связки зерен.

На первом этапе приспособляемости абсолютное значение износа на порядок выше, чем в третьем. Первые два этапа очень непродолжительные, третий может длиться столько же, сколько при работе алмазных пар трения и определяется интенсивностью термоактивируемых процессов. Продолжительность каждого этапа в зависимости от марки СТМ различно и определяется микротвердостью и прочностью обрабатываемого материала и зерен и условиями шлифования. Так, для поликристаллов алмаза первый этап в пять–шесть



раз короче, чем для СТМ на основе нитрида бора (см. табл. 4.1). Изучение режущей поверхности алмазных кругов на растровом электронном микроскопе дало возможность выделить различные виды износа, соответствующие указанным периодам интенсивности. В начале первого периода износ алмазных зерен происходит в результате хрупкого микроразрушения, и они имеют развитый тонкий рельеф (см. рис. 4.5). В переходный период износа из-за уменьшения высоты выступания зерна над связкой, а, следовательно, увеличения фактической площади контакта  $A_f$  возможности проявления хрупкого микроразрушения исчерпываются. На этапе наименьшего, медленно убывающего износа на поверхности зерен видны гладкие площадки, возникающие в результате термоактивируемых видов износа (см. рис. 4.4 б). В переходный период наблюдались зерна с совокупностью отмеченных характеристик поверхности.

Количественным подтверждением изменяющегося характера износа служит изменение соотношения числа зерен с развитым рельефом, с площадками износа и выпавших из связки (табл. 4.5). Снижение интенсивности износа можно объяснить изменением количества контактирующих зерен. За 2 мин шлифования оно возрастает в пять–десять раз, что значительно снижает интенсивность воздействия единичного алмазного зерна на СТМ, а также способность зерна к хрупкому микроразрушению (самозатачиванию). Обработываемый поликристалл опирается на площадки износа алмазных зерен, происходит взаимное истирание алмазных поверхностей, наблюдается резкое падение удельной интенсивности шлифования и изменения всех параметров режущего рельефа (см. табл. 4.3).

Таблица 4.5 –Фактическая площадь контакта и состояние зерен на РПК

Обработываемый материал	Состояние зерен	Относительная фактическая площадь контакта, %						
		0.05	0.1	2	10	30	60	80
АСБ	Острые	83	63	41	30	25	19	12
	С площадками износа	7	19	43	52	62	67	73
	Выпавшие	10	18	16	18	13	14	15

Износ алмазных зерен круга неодинаков по интенсивности и природе на разных этапах шлифования, различно и состояние их микрорельефа, а, значит, неодинаков и характер воздействия на обрабатываемый материал.

Установлено, что состояние режущего рельефа круга, в частности фактическая площадь контакта  $A_r$  (относительная опорная площадь РПК  $t_{ps}$ ) в большей мере определяет физические явления, протекающие в зоне обработки. Так, при одних и тех же условиях шлифования ДАП (круг 12А2 150×10×3×32 АС6 50/40 М1-01 4) только за счет уменьшения относительной величины фактической площади контакта РПК–СТМ сила  $P_z$  возрастает в три–четыре раза (рис. 4.7). Это объясняется тем, что в результате уменьшения фактической площади контакта алмазные зерна разрушаются преимущественно в результате их хрупкого микроскалывания с образованием острых субмикроромок (табл. 4.6). При постоянном значении нормальной нагрузки  $P_y$  возрастает удельное давление на поликристалл, увеличивается работа разрушения, совершаемая отдельным зерном. Наблюдаемый рост силы  $P_z$  может быть обусловлен и повышением сил трения.

Таблица 4.6. – Влияние фактической площади контакта на преобладающий вид износа

Преобладающий вид износа	Относительная величина фактической площади контакта, %, для связок		
	ПМ-12	М1-01	М6-14
Хрупкое микроразрушение	0.1–3	0.1–4	0.1–5
Хрупкое микроразрушение в сочетании с физико-химическими процессами	3–11	4–12	5–17
Истирание и термоактивируемые явления	11–18	12–86	17–91

Сопоставление этих данных с приведенными в табл. 4.6 преобладающими видами износа позволяет выделить третий этап приспособляемости как наиболее предпочтительный для обеспечения прецизионной обработки алмазных поликристаллов. Он характеризуется наименьшей интенсивностью размерного износа зерен. Высокая энергоемкость съема при его малых абсолютных значениях указывает не только на повышение степени механического диспергирования снимаемых объемов шлифуемого алмазного поликристалла, но и свидетельствует о трансформации механизма съема. Известно, что алмазная кристаллическая решетка характеризуется высокой силой межатомных связей. В условиях трения чистых поверхностей, влияния диффузии и возможности графитизации удаление происходит на атомно-молекулярном уровне, что является причиной такого высокого расхода удельной энергии (рис. 4.7). Но с дру-

гой стороны, в случае обеспечения соответствующей жесткости системы «СПИД» только в условиях третьего этапа приспособляемости стабильность рабочей поверхности круга создает все предпосылки для обеспечения прецизионной обработки. Причем не только требуемые размеры, но и структура поверхности и ее качество будут обеспечиваться.

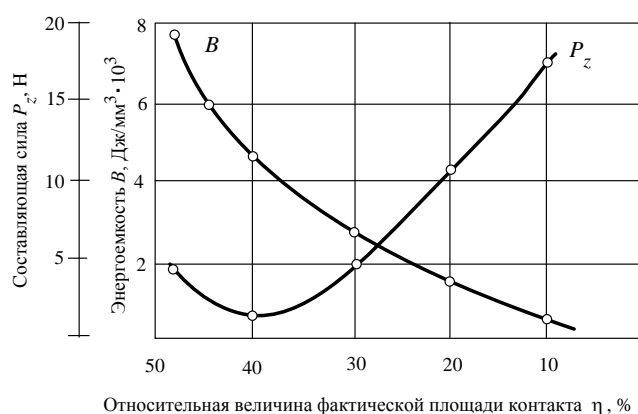


Рис. 4.7. Параметры энергетической приспособляемости: обрабатываемый материал – ДАП; скорость круга  $V = 20$  м/с; продольная подача  $S_{пр} = 1$  м/мин; нормальное давление  $P_n = 2.0$  МПа; круг 12A2 150×10×3×32 AC6 50/40 M1-01

Процесс прецизионного (доводочного) шлифования СТМ основан на использовании термоактивируемых видов износа, которые присущи не только алмазным зернам, но и поверхности СТМ, поскольку материалы их идентичны. При этом будут реализованы такие виды износа как окисление, графитизация, диффузия (см. гл. 7).

#### 4.4. Топографическая приспособляемость в процессе алмазного шлифования

Ранее установлено, что аномально высокая интенсивность потери режущих свойств алмазными кругами на металлических связках зависит от резкого уменьшения высоты выступания алмазных зерен [32, 33, 165]. Наши исследования показали, что определяющим параметром топографической приспособляемости системы РПК–СТМ является не высота зерен, а относительная величина фактической площади контакта ее элементов.

**Примечание [V294]:** Стр: 134  
[a№798] Грабченко А. И. Научные основы алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов: Диссертация в форме научного доклада докт. техн. наук: 05.03.01. - Харьков, 1995. - 59 с. {Book: Date 03/09/02 Time 16:16:21}

**Примечание [V295]:** Стр: 134  
[a№284] Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. - Харьков: Вища шк., 1985. - 184 с. {Book: Date 03/09/02 Time 16:16:57}

**Примечание [V296]:** Стр: 134  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 03/09/02 Time 16:15:54}

В основе топографической приспособляемости лежит интенсивный износ алмазных кругов и уменьшение развитости субмикрорельефа обрабатываемой поверхности СТМ. Исходная (после вскрытия) поверхность шлифовально-го алмазного круга обладает комплексом физико-механических, геометрических, микро- и субмикрogeометрических свойств, которые определяют его потенциальную работоспособность, экономичность и качество обработки. В процессе шлифования взаимодействующие поверхности РПК и СТМ подвергаются воздействию значительных сил, высокой температуры, интенсивного трения и физико-химических явлений. Происходит изменение рельефа режущей поверхности круга и СТМ, изменение их свойств. Таким образом, макро и микропрофиль круга и СТМ, субмикрорельеф режущих зерен и геометрические параметры их вершин, физико-механические свойства абразивного материала являются функцией условий и продолжительности шлифования.

Проведенные ранее исследования [36, 165], показали, что на первом этапе шлифования (вновь вскрытым кругом) преимущественную роль играет топографическая приспособляемость, особенно рабочей поверхности алмазных зерен (микротопография) и режущего рельефа круга (макроеометрия). В этот период топография дискретной алмазной рабочей поверхности круга в процессе высокоскоростного контактного взаимодействия с поверхностью обрабатываемого СТМ стремится перестроиться в поверхность, позволяющую уменьшить энергонапряженность процесса. При этом происходит интенсивная трансформация топографических показателей, как поверхности отдельных алмазных зерен, так и всех основных 3D параметров рабочей поверхности круга.

На этом этапе субмикрорельефа алмазных зерен трансформируются в площадки износа и существенно изменяется характер зависимости величины относительной опорной площади топографии рабочей поверхности круга  $t_{ps}$  (рис. 4.8). Анализ показывает, что главной причиной аномально быстрой потери режущих свойств алмазных кругов при обработке СТМ является интенсивное изменение субмикрорельефа алмазных зерен. Динамика изменения величин пятен контакта в системе «зерно – СТМ» такова, что за 1 – 2 минуты шлифования величина площади фактического контакта зерна с СТМ возрастает (при неизменных условиях шлифования) с 0.000837 до 15 мкм [24, 33, 42], т.е. более чем в 15 тысяч раз. Такое интенсивное изменение микротопографии алмазных зерен приводит к резкому уменьшению сосредоточенности прилагаемых нагрузок, снижению напряженного состояния в локальных объемах кристаллитов

**Примечание [V297]:** Стр: 135  
[a№3006] Грабченко А. И. Научные основы алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов: Диссертация в форме научного доклада докт. техн. наук: 05.03.01. - Харьков, 1995. - 59 с. {Book: Date 03/09/02 Time 16:17:33}

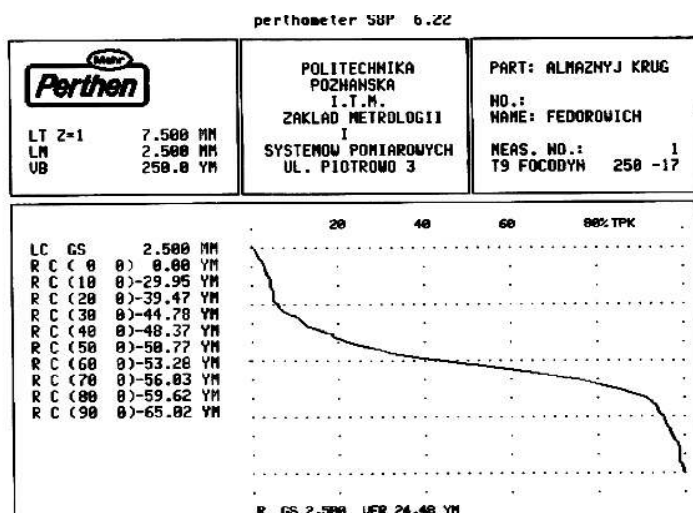
**Примечание [V298]:** Стр: 135  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 31/08/02 Time 09:54:52}

**Примечание [V299]:** Стр: 135  
[a№3162] Вишневецкий А.С., Лысенко А.В., Пименкевич А.Н. О некоторых микродефектах в синтетических алмазах // Синтетические алмазы. - 1977. - Вып. 2. {Book: Date 31/08/02 Time 09:59:11}

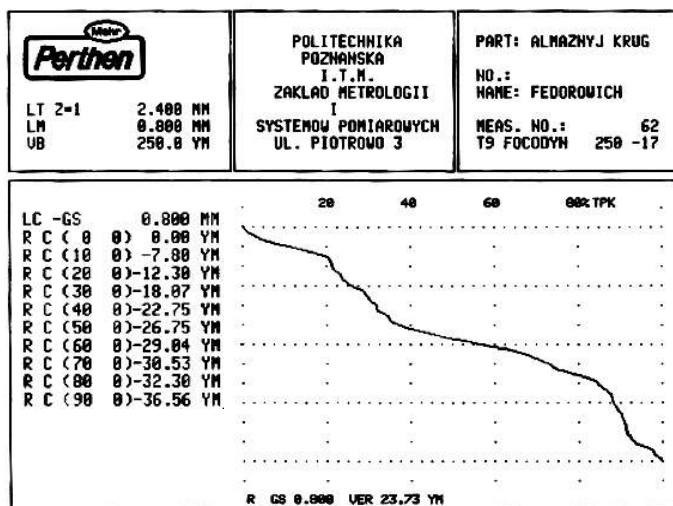
**Примечание [V300]:** Стр: 135  
[a№284] Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. - Харьков: Вища шк., 1985. - 184 с. {Book: Date 31/08/02 Time 10:00:30}

**Примечание [V301]:** Стр: 135  
[a№3161] Григорьев О.Н., Мильман Ю.В., Панченко Э.Л. Прочность и разрушение зерен синтетических алмазов // Физика разрушения. Тез. док. IV. Всесоюзная конф. - Киев: ИПМ АН УССР. - 1980. - Т. 2. {Book: Date 31/08/02 Time 09:58:09}

СТМ, прилегающих к пятну контакта и, как следствие, прекращению механического микроразрушения припуска. Даже незначительное число площадок износа на алмазных зернах существенно уменьшает величину напряжений в контакте «РПК–СТМ» (см. рис. 4.6).



a



б

Рис. 4.8. Изменение относительной опорной площади 3D топографии рабочей поверхности круга в процессе шлифования:  
 а – после 5-ти секунд шлифования; б – после 180-ти секунд шлифования

В этот период процесс алмазного шлифования трансформируется в процесс трения двух равнотвердых алмазных структур. Топографическая приспособляемость практически закончена, энергетические затраты на процесс шлифования сводятся к минимуму, однако удельная энергоемкость процесса съема возрастает (см. рис. 4.7). Наличие незначительного съема объясняется ролью термоактивируемых процессов – окисления, графитизации и диффузии.

Установлено, что исследуемые нами параметры макротопографии круга в первые минуты шлифования претерпевают существенные изменения (см. табл. 4.5). Так, за две минуты шлифования количество зерен с развитой микротопографией уменьшается с 96 % до 12 %, число зерен с площадками износа увеличивается от 4 % до 69 %, 19 % зерен выпали из связки. Относительная опорная площадь топографии РПК на уровне  $P = 5$  мкм достигает через 2 минуты шлифования 18 % (см. рис. 4.8). Из приведенного анализа можно сделать вывод, что для высокопроизводительных процессов алмазного шлифования следует главное внимание уделить управлению микро- и макротопографической приспособляемостью рабочей поверхности круга.

Можно предположить (доказано в гл. 7), что на различных этапах шлифования приспособляемость может играть различную роль. Управляя степенью интенсивности приспособляемости можно один и тот же процесс алмазного шлифования трансформировать из высокопроизводительного в прецизионный и наоборот.

Интенсивное изменение всех выходных показателей связано, прежде всего, с увеличением фактической площади контакта РПК–СТМ не только за счет износа зерен и образования на них площадок износа, но и за счет сглаживания шероховатости обработанной поверхности. Важнейшим показателем при этом является относительная опорная площадь топографии РПК  $t_{psРПК}$  и обрабатываемого СТМ  $t_{psСТМ}$ . Увеличение  $t_{psРПК}$  и  $t_{psСТМ}$  приводит к росту фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ» и, как следствие, уменьшению величины давлений в контакте.

Таким образом, топографическая приспособляемость в системе РПК–СТМ содержит существенные резервы повышения эффективности алмазного шлифования СТМ. Она в большой степени определяет и структурно-фазовые аспекты приспособляемости.

#### 4.5. Структурно-фазовые аспекты приспособляемости

На втором этапе приспособляемости (после практического завершения топографической) превалирующую роль играет структурно-фазовая приспособляемость трущихся поверхностей (площадки износа алмазных зерен и обработанная поверхность СТМ). На этом этапе съем припуска минимизируется и осуществляется в основном за счет термоактивируемых процессов окисления, графитизации, анизотропии тепловых деформаций кристаллитов составляющих фаз, изменения теплофизических характеристик СТМ. Следовательно, в прецизионных процессах алмазного шлифования СТМ особое внимание следует уделять структурно-фазовым аспектам приспособляемости.

Структурная приспособляемость РПК характеризуется протеканием различных взаимосвязанных процессов. При первом же контакте зерна с СТМ наряду с процессами хрупкого разрушения обоих контактирующих тел может происходить упругий поворот или смещение зерна, закрепленного в пластичном материале (роль упругости связки рассматривается в гл. 6). Такой поворот или смещение во многом определяется как геометрией зерна и обрабатываемого СТМ, так и механическими свойствами связки. Частично диссипация энергии происходит при реализации именно этих процессов. Локальное выделение тепла, наряду с небольшим изменением физико-механических свойств зерна, приводит к ослаблению сил сцепления «зерно–связка» за счет повышения температуры последней по всей поверхности удержания. Поэтому последующий контакт зерна с СТМ произойдет в условиях, когда связка несколько ослабла, естественно, что такой процесс не может продолжаться бесконечно и наряду с поворотом зерна происходит частичное разрушение обрабатываемого СТМ. Быстрая структурная приспособляемость, вероятно, является следствием установления зерна в связке в таком положении, когда на контактирующую поверхность выйдет участок зерна с минимально развитой микрогеометрией, но с максимально подстроенной структурой, упрочненной в процессе дальнейшего трения зерен круга по СТМ или наиболее «твердая» грань кристаллита. Оценка структурной составляющей приспособляемости по изменению площади контакта «твердых» и «мягких» граней заслуживает особого внимания, что обусловлено существенной анизотропией физико-механических свойств кристаллитов, входящих в состав СТМ и алмазных зерен. Из-за существенной неравномерности интенсивностей износа различно ориентированных к зоне контакта



кристаллитов СТМ и алмазных зерен в процессе шлифования структура контактирующих поверхностей изменяется. «Мягкие» грани изнашиваются на порядок интенсивнее «твердых» [165] и вследствие упругого демпфирования зерен в связке через определенный период шлифования поверхность СТМ будет представлять ячеистую структуру, в которой на поверхности контакта будут преимущественно «твердые» грани кристаллитов СТМ. Такая структурная приспособляемость существенно влияет на число реально работающих зерен и на величину фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ». Роль анизотропии физико-механических свойств кристаллитов СТМ и алмазных зерен в процессе приспособляемости рассмотрена в п. 5.7.

Свой вклад в структурно-фазовую приспособляемость вносят процессы графитизации и окисления контактирующих СТМ и алмазных зерен. Особенно эти процессы интенсифицируются при реализации второго типа взаимодействия в системе РПК–СТМ, т. е. при наличии контакта металлической связки с обрабатываемым материалом. Отрицательное влияние этих видов износа алмазных инструментов, отмеченное Т. Н. Лолодзе и Г. В. Бокучава [97], может быть использовано в качестве положительного эффекта в процессе термоактивируемой доводки лезвийного инструмента из СТМ на основе алмаза (см. гл. 7). К структурно-фазовым аспектам приспособляемости можно отнести процесс миграции металлофазы СТМ, обусловленный существенным различием величин коэффициента термического расширения ее и алмазных кристаллитов (рис. 4.9). При этом образующийся в зоне контакта графит и металлофаза могут играть роль твердой смазки и влиять на энергетические аспекты приспособляемости.

Таким образом, процесс структурно-фазовой приспособляемости носит в нашем случае комплексный характер. В обобщенном виде он включает следующие составляющие: 1) образование в зоне контакта «РПК–СТМ» графита как продукта графитизации контактирующих поверхностей и миграцию металлофазы к зоне контакта; 2) образование в зоне шлифования преимущественного контакта пар «твердый» кристаллит – «твердое» алмазное зерно за счет опережающего износа их «мягких» граней.

Выдвинута гипотеза о возможности трансформации процесса высокопроизводительного шлифования в прецизионный (доводочный), где ответственными за съем являются термоактивируемые процессы.

**Примечание [V302]:** Стр: 139  
[a№3085] Лолодзе Т.Н., Бокучава Г.В.  
Износ алмазов и алмазных кругов. - М.:  
Машиностроение, 1967. - 112 с. {Book:  
Date 03/09/02 Time 16:18:17}

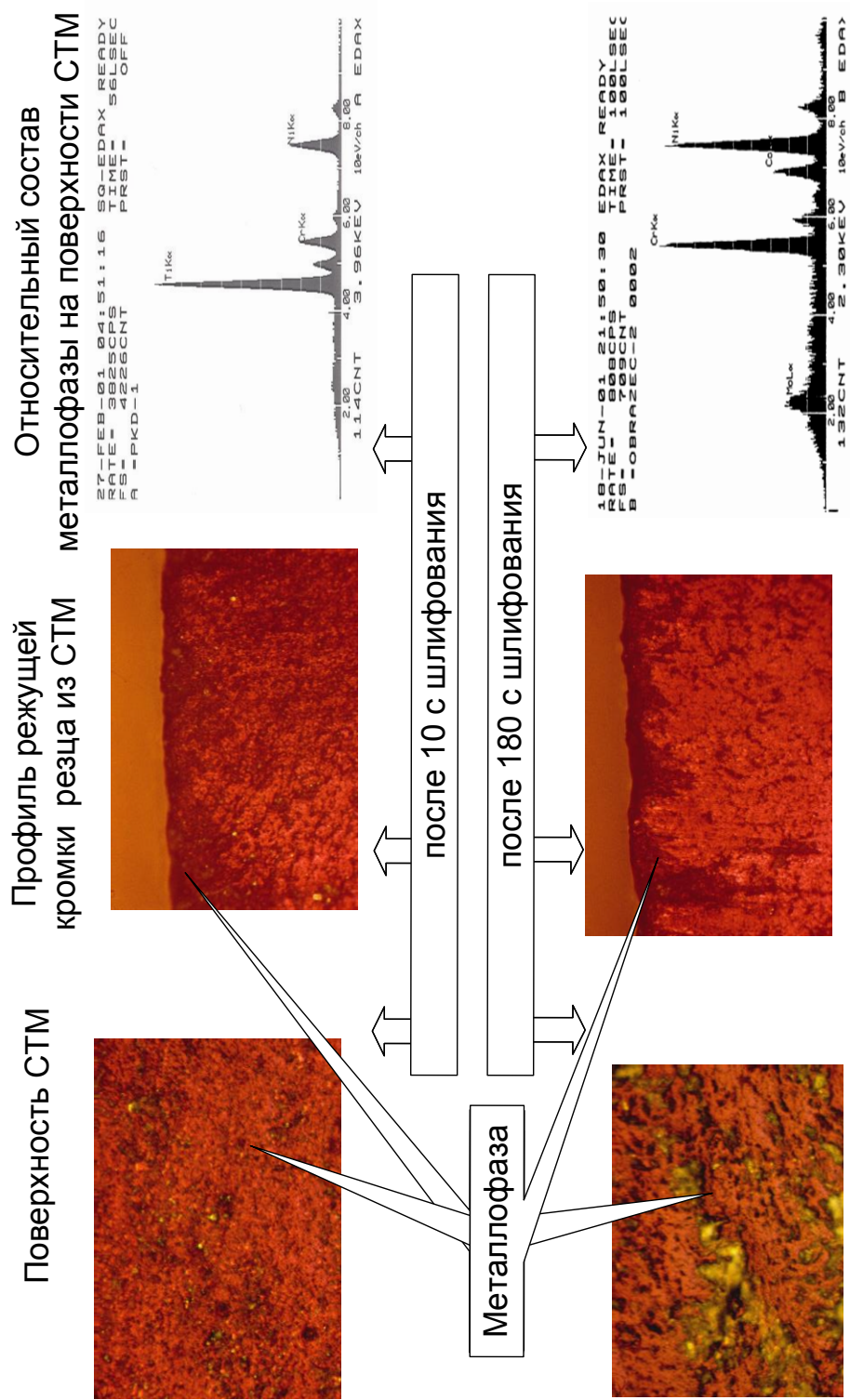


Рис. 4.9. К структурно-фазовой приспособляемости при алмазном шлифовании STM

#### 4.6. Влияние анизотропии свойств кристаллитов СТМ

Общепринятое представление о том, что СТМ в силу равновероятного расположения в нем кристаллитов можно считать изотропным материалом [156, 234], не совсем точно. Если рассматривать СТМ в макрообъеме, то такое представление верно. Но при алмазном шлифовании, когда величина пятна контакта «СТМ–зерно» составляет по данным [165] от 0.01 до 10 мкм, а размеры кристаллитов в различных СТМ изменяются от 5 до 300 мкм, условно можно считать, что идет обработка каждого отдельного кристаллита. Такой подход может иметь место при обработке и других материалов с анизотропными составляющими [233, 234, 241].

Технология огранки природных алмазов в бриллианты основана на использовании анизотропии их физико-механических свойств [60]. А поскольку кристаллиты в СТМ также обладают анизотропией свойств и могут быть ориентированы к зоне контакта как «мягкой» так и «твердой» гранью, а алмазное зерно (монокристаллы) аналогично, то процесс шлифования СТМ следует рассматривать как процесс высокоскоростного контактного взаимодействия различных пар «мягких» и «твердых» кристаллитов СТМ и алмазных зерен.

Обрабатываемую поверхность СТМ условно рассматриваем как композиционную, состоящую из «мягких» и «твёрдых» граней, интенсивность шлифования которых различается в 10 – 100 раз [60, 165]. В процессе алмазного шлифования СТМ интенсивность съема припуска с кристаллитов, ориентированных к зоне контакта «твердой» или «мягкой» гранью, будет существенно различной. Представляет интерес возможность «попадания» зерна во «впадину» («мягкую» грань) в зависимости от скорости шлифования  $V_{кр}$ , размеров кристаллитов  $L$ , модуля упругости связки, зернистости и концентрации алмазных зерен, нормального давления и толщины алмазоносного слоя. Эти условия будут определяться также частотой собственных колебаний зёрен в круге. В зависимости от того, «успевает» или нет алмазное зерно отреагировать на анизотропию износа кристаллитов СТМ, характер и интенсивность их взаимного микроразрушения будут существенно различными (рис. 4.10).

В процессе алмазного шлифования основополагающее влияние на интенсивность процесса взаимного микроразрушения элементов системы «СТМ – зерно» оказывает не столько твердость различных граней кристаллитов СТМ и зерен, как их прочность (например, трещиностойкость). Анизотропия основных физико-механических свойств кристалла СТМ приведена на рис. 4.10 ж.

**Примечание [V303]:** Стр: 145  
[a№3142] Sato M., Kato Y., Aoki S. Effects of crystal orientation on the cutting mechanism of the aluminium single crystal Bulletin // JSME 26(1983)215. - P. 890-896. {Book: Date 03/09/02 Time 16:32:21}

**Примечание [V304]:** Стр: 145  
[a№3141] Sato M., Kato Y., Tuchiya K. Effects of Material Anisotropy upon the cutting mechanism // Trans. JIM. - 1978. - Vol. 19. - P. 530-536. {Book: Date 03/09/02 Time 16:32:48}

**Примечание [V305]:** Стр: 145  
[a№3151] Ueda K., Iwata K., Nakayama K. Chip Formation Mechanism in single crystal cutting of b-brass // Annals of the CIRP 29(1980)1. - P. 41-46. {Book: Date 03/09/02 Time 16:33:32}

**Примечание [V306]:** Стр: 145  
[a№3061] Епифанов В.И., Песина А.Я., Зыков Л.В. Технология обработки алмазов в бриллианты. - М.: Высш. шк., 1984. - 319 с. {Book: Date 03/09/02 Time 16:34:01}

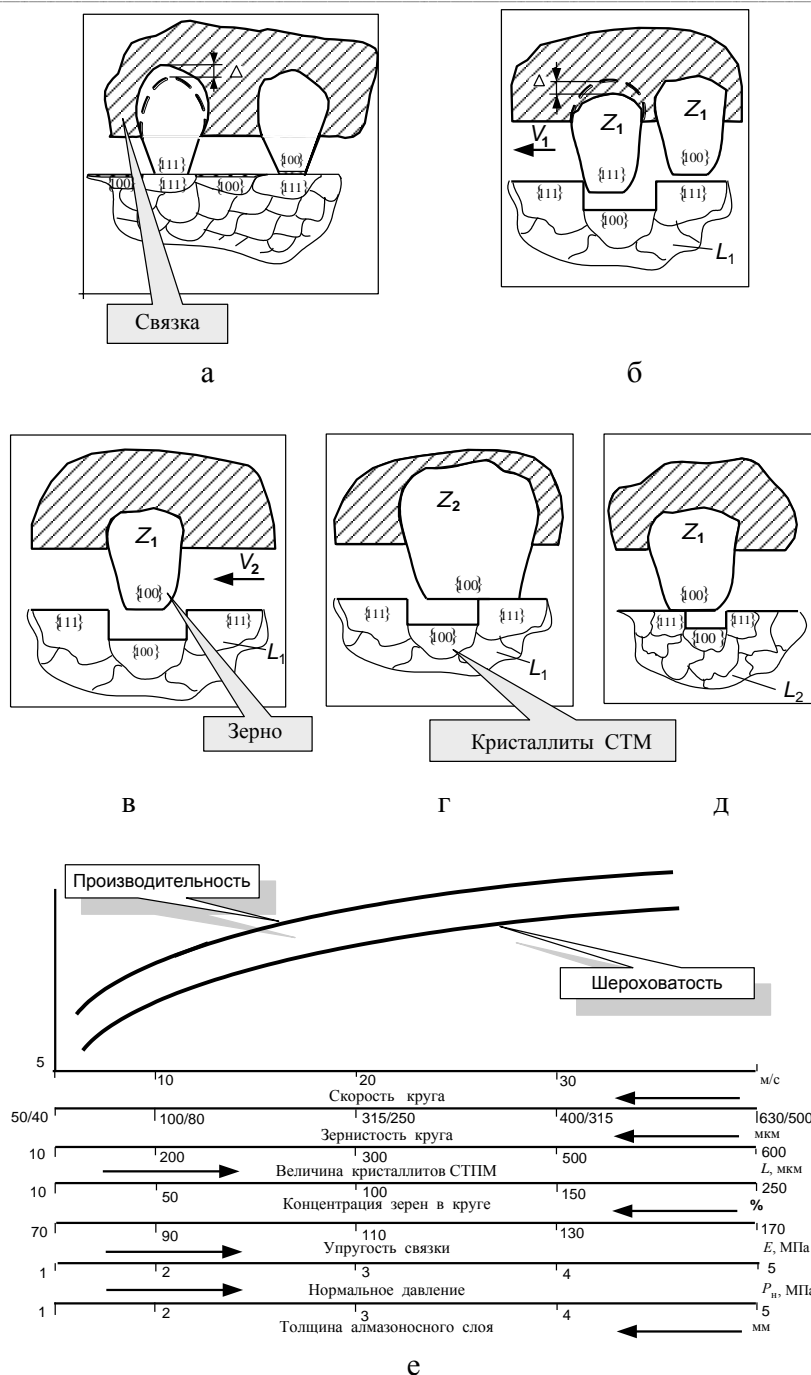


Рис. 4.10. Влияние анизотропии свойств кристаллитов на выбор условий обработки СТПМ: а, б, в, г, д – расчетные схемы;  $V_2 > V_1$ ;  $Z_2 > Z_1$ ;  $L_1 > L_2$ ;  $\Delta$  – величина упругого вдавливания зерна в связку;  $V$  – скорость круга;  $Z$  – величина зерна;  $L$  – величина кристаллитов; е – тенденции изменения показателей шлифования от условий шлифования

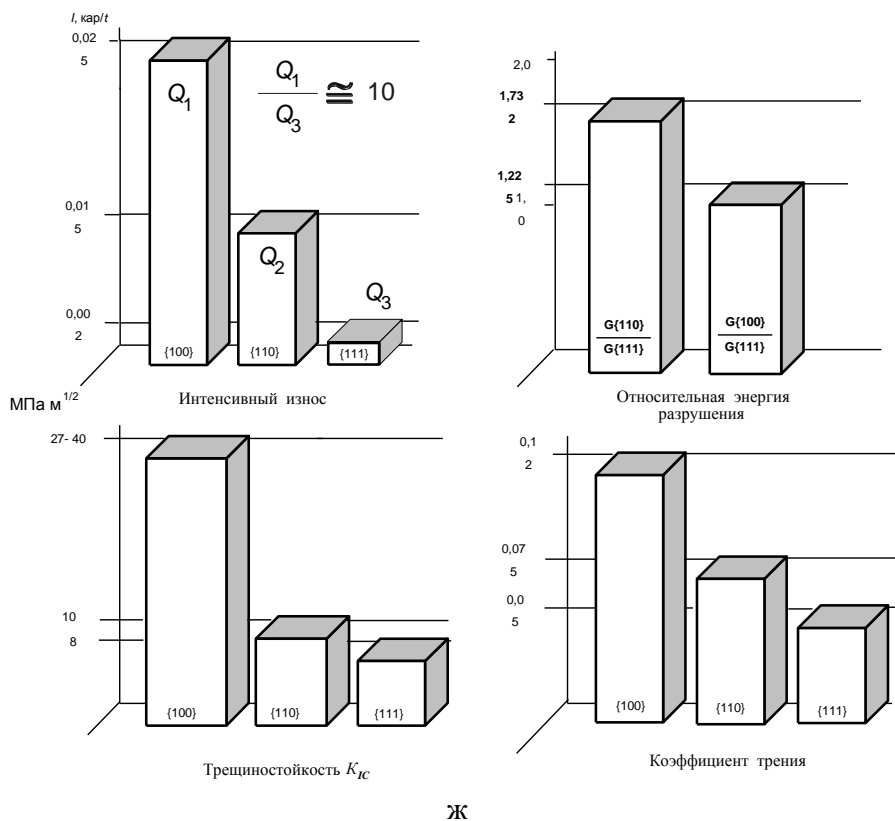


Рис. 4.10. Влияние анизотропии свойств кристаллитов на выбор условий обработки СТМ (продолжение): ж – анизотропия свойств кристаллитов и зерен

Если учесть, что алмазные зерна марок AC15, AC32, AC80 и выше представляют собой монокристаллы, а, следовательно, им присуща анизотропия физико-механических свойств, характерная для природных алмазов, в процессе шлифования следует учитывать интенсивность их износа в зависимости от ориентации их к поверхности контакта.

На электронно-микроскопических снимках обработанной поверхности АСБ и при ее лазерном сканировании можно отчетливо наблюдать результаты различной интенсивности износа «мягких» и «твердых» граней кристаллитов [193]. Следовательно, при изучении процессов взаимного разрушения (износа) элементов системы «СТМ – зерно» при алмазном шлифовании необходимо учитывать анизотропию свойств кристаллитов СТМ и зерен, которая, как показано в п. 1.3, существенно влияет на интенсивность этого процесса.

Таким образом, при расчете числа фактически работающих зерен надо учитывать «твердые» зерна и интенсивно изнашиваемые – «мягкие». Вероятность нахождения в контакте «мягких» и «твердых» граней согласно расположению кристаллографических осей можно принять равной  $P = 1/8$ . Из всех кристаллитов на поверхности СТМ только 1/8 контактирует с РПК «твердой» гранью, остальные либо «мягкой» либо занимают промежуточные положения.

Исходя из различной интенсивности износа контактирующих «мягких» и «твердых» граней кристаллитов обрабатываемого СТМ и алмазных зерен следует рассматривать различные схемы расчета взаимного разрушения элементов системы «СТМ – зерно» (см. рис. 4.10 а, б, в, г, д).

Согласно этим схемам взаимодействия «твердых» или «мягких» граней кристаллитов СТМ и алмазных зерен исследовали процесс назначения режимов шлифования (скорость шлифования, нормальное давление, зернистость круга, модуль упругости связки, концентрация зерен) с учетом возможности отслеживания каждым алмазным зерном круга анизотропии свойств как алмазного зерна, так и кристаллитов СТМ. С учетом собственных (или вынужденных) колебаний алмазных зерен в связке круга можно расчетным путем определить оптимальную область режимов шлифования и характеристик кругов, обеспечивающих либо процесс производительного (см. рис. 4.10 б), либо прецизионного (см. рис. 4.10 в, г, д) шлифования СТМ. Для этого производим расчеты, позволяющие оценить, «успеет» ли алмазное зерно при реальных скоростях круга за счет собственных (или вынужденных ультразвуковых) колебаний обработать «мягкую» грань кристаллита СТМ и разрушить «твердую» грань кристаллита. Различные механизмы микроразрушения кристаллитов СТМ и алмазных зерен обуславливают преимущественное проявление тех или иных аспектов приспособляемости.

В силу упругих внедрений зерен в металлическую связку поверхность СТМ через некоторое время шлифования должна представлять собой ячеистую структуру (см. рис. 4.10 а, б, в), наличие которой убедительно подтверждается при лазерном сканировании поверхности СТМ. С учетом колебаний алмазных зерен в связке представляет интерес возможность «попадания» зерна во «впадину» (мягкую грань), в зависимости от скорости шлифования  $V_{кр}$ , размеров кристаллитов  $L$ , модуля упругости связки. Возможность управления этим процессом путем введения в зону шлифования и/или управления энергии ультразвуковых колебаний рассмотрена в п. 7.7.

Таким образом, при необходимости осуществлять производительный или прецизионный процесс алмазного шлифования различных СТМ необходимо с учетом величины их кристаллитов, собственных или вынужденных колебаний алмазных зерен в связке назначать соответствующую скорость шлифования, нормальное давление и характеристики алмазного круга. Обоснована необходимость учета анизотропии (микроанизотропии) свойств СТМ при определении условий их обработки.

#### 4.6. Анализ причин возникновения дефектного слоя

Определяющим недостатком процесса алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов (СТМ) является значительный процент брака (до 30 %) из-за появления на обработанной поверхности сетки микротрещин или вскрытия внутренних дефектов, привнесенных еще при синтезе СТМ. Включения металла-катализатора (растворителя) сохраняются в СТМ и алмазных зернах после синтеза и концентрируются преимущественно в плоскости (111) [71]. Учитывая многофазность алмазных поликристаллов, существенное различие коэффициентов теплового расширения (КТР) металлических включений и алмазной матрицы, а также анизотропию свойств кристаллитов СТМ и алмазных зерен, следует ожидать проявления межфазных микронапряжений, которые могут влиять как на процесс микроразрушения (съем припуска), так и на макроразрушение (образование дефектного слоя) при шлифовании. По-видимому, это является одной из причин образования трещин на резцах из СТМ при заточке их кругами на органической связке. Н. В. Новиков [122] показал, что разрушение СТМ и композиционных СТМ в значительной степени определяется термоупругими напряжениями, связанными с различием КТР алмаза и металлофазы. Очевидно, это связано также и с анизотропией свойств кристаллитов СТМ. Указанный вывод подтверждается тем, что в ювелирных алмазах, которые не содержат включений, и обработка которых сопровождается значительными температурами (до 600–700° С), трещин не образуется [68].

Известно, что нагрев синтетических алмазов до температуры, превышающей температуру плавления металла – растворителя, приводит к образованию трещин и разрушению вследствие возникновения значительных напряжений и неоднородности структуры [70]. Прочность СТМ после нагрева уменьшается в 2 – 9 раз.

**Примечание [V307]:** Стр: 141 [a№3033] Новиков Н.В., Примак Л.П., Майстренко А.Л., Ващенко А.Д. Исследование распространения усталостных трещин в монокристаллах синтетических алмазов // ДАН СССР. - 1981. Вып. 256. - С. 1122-1126. {Book: Date 03/09/02 Time 14:01:05}

**Примечание [V308]:** Стр: 141 [a№3057] Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н. Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов. - Киев: Наук. думка, 1993. - 220 с. {Book: Date 03/09/02 Time 16:19:04}

**Примечание [V309]:** Стр: 141 [a№3022] Бакуль В.Н., Шульженко А.А., Крук В.Б., Гетьман А.Ф. Исследование процесса окисления синтетических и природных алмазов // Синтетические алмазы. - 1976. Вып. 2. - С. 3-5. {Book: Date 03/09/02 Time 16:19:50}

**Примечание [V310]:** Стр: 141 [a№3070] Цыпин Н.В., Симкин Э.С., Тумас Б.Ю., Гаргин В.Г. Изменения, происходящие в алмазах при изготовлении и эксплуатации алмазных буровых инструментов // Синтетические алмазы - ключ к техническому прогрессу. - Киев: Наук. думка. - 1977. - Т.1. С. 64-68. {Book: Date 31/08/02 Time 10:16:07}



Поскольку основным видом изделий из СТМ в настоящее время является лезвийный инструмент, качество алмазного шлифования рассматривали применительно к его заточке. Эффективность и надежность работы лезвийного инструмента из СТМ определяется кроме шероховатости его граней и режущих кромок, радиусом их округления, также отсутствием внутренних дефектов и сетки микротрещин на рабочих поверхностях. Высокая стойкость такого инструмента делает его потенциально эффективным для применения в автоматизированном производстве. Однако современная технология синтеза СТМ не дает полной гарантии стабильности его качества, что ограничивает широкое применение инструмента из СТМ. Внутренние дефекты, получаемые при синтезе СТМ, проявляются даже после процесса заточки, т.е. в процессе его эксплуатации, что существенно снижает уровень надежности этого инструмента. Образование микротрещин может быть обусловлено действием одного или сразу нескольких механизмов термического разрушения: различием коэффициентов термического расширения алмазных кристаллитов и металлофазы, окислением меж- и внутрикристаллитных включений СТМ.

Из-за того, что приведенный модуль упругости и коэффициент температурного расширения (КТР) металлофазы существенно (в 4 раза) отличаются от соответствующих свойств алмаза (алмаз  $\alpha = 3.7 \cdot 10^{-6}$ ; металлофаза  $14 \cdot 10^{-6}$ ), при нагреве создаются внутренние давления, которые могут приводить к неуправляемому макроразрушению СТМ, появлению сетки микротрещин и миграции металлофазы на поверхность (рис. 4.11 а). Уровень давления в плоскости можно оценить из соотношения [122]

$$q = K_2 (\alpha_2 - \alpha_1) (T_1 - T_0), \quad (4.3)$$

где  $K_2$ ,  $\alpha_2$  – приведенные модуль объемного сжатия и КТР металлофазы никель-марганца, находящихся в равной пропорции;

$T_1$  – температура, при которой происходит выход капель металлофазы на поверхность алмаза, сопровождаемого образованием трещин.

В исследованиях А. С. Вишневого и А. Г. Гонтора [24] эта температура соответствует 973 К. Коэффициент температурного расширения алмаза в диапазоне до 750 К,  $\alpha_1 = 7 \cdot 10^{-6}$  К. Величина термического давления в полости с металлофазой по зависимости (4.3) равна  $q = 1445.6$  МПа. Однако данная расчетная схема не учитывает влияние силового фактора на уровень напряжений в СТМ, и решается в условиях плоского 2D моделирования.

Примечание [V311]: Стр: 142  
сравни на стр 43 бумажного варианта

Примечание [V312]: Стр: 142  
[a№3057] Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н. Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов. - Киев: Наук. думка, 1993. - 220 с. {Book: Date 03/09/02 Time 16:29:46}

Теоретический анализ термосилового 3D НДС системы «Кристаллиты-металлофаза–зерно–связка» методом конечных элементов (МКЭ) осуществлялся в пакете программного комплекса типа Cosmos с применением восьми узловых элементов SOLID (2847 узлов, 1640 элементов). СТМ моделировали в виде совокупности кристаллитов кубической формы размерами  $0.2 \times 0.2 \times 0.2$  мм с произвольно размещенными в нем прослойками металлофазы размерами  $20 \times 200 \times 200$  мкм. Расчетная схема модели представлена на рис. 4.11 б.

Достоинством данной методики является возможность в объемном варианте (3D модель) оценить отдельно влияние поперечной подачи  $S_{\text{поп}}$ , величины нормального давления в контакте «РПК–СТМ»  $P_n$ , физико-механических свойств СТМ, алмазных зерен и связки, температуры в зоне шлифования, температуры СОЖ на температурные поля, величину главных и приведенных напряжений, вызванных как отдельно силовыми и температурными факторами, так и их суммарным воздействием (термосиловые напряжения). Пакет позволяет также оценивать энергию и плотности энергии деформации, по которым можно определять возможность образования и развития микротрещин как на поверхности СТМ и алмазных зерен, так и развития внутренних микротрещин.

Температура в зоне контакта «РПК–СТМ» варьировалась в диапазоне  $T = 700 - 1200^\circ\text{C}$ , температура СОЖ  $T = 20^\circ\text{C}$ , поперечная подача (силовое воздействие)  $S_{\text{поп}} = 5$  мкм/дв. ход.

Данная методика расчета обеспечивает получение трехмерных температурных полей (рис. 4.11 г), трехмерных термосиловых полей энергии деформации (рис. 4.11 в).

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния 3D модели системы «кристаллиты СТМ – металлофаза – зерно – связка» приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.7 – Зависимость межкристаллитных термических и термосиловых напряжений от температуры

Приведенные напряжения, МПа	Температура, °C							
	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
Максимальное	$\frac{824}{1123.2}$	$\frac{928}{1227.3}$	$\frac{1083}{1332.8}$	$\frac{1128}{1437.6}$	$\frac{1243}{1542.9}$	$\frac{1418}{1647.2}$	$\frac{1552}{1751.6}$	$\frac{1657}{1856.7}$
Минимальное	$\frac{515}{719.55}$	$\frac{685.6}{781.46}$	$\frac{703.6}{813.37}$	$\frac{765.6}{875.28}$	$\frac{814.3}{917.19}$	$\frac{876.2}{969.10}$	$\frac{1012.7}{1221.0}$	$\frac{1389.7}{1422.9}$

Примечание: числитель – термонапряжения; знаменатель – термосиловые напряжения.

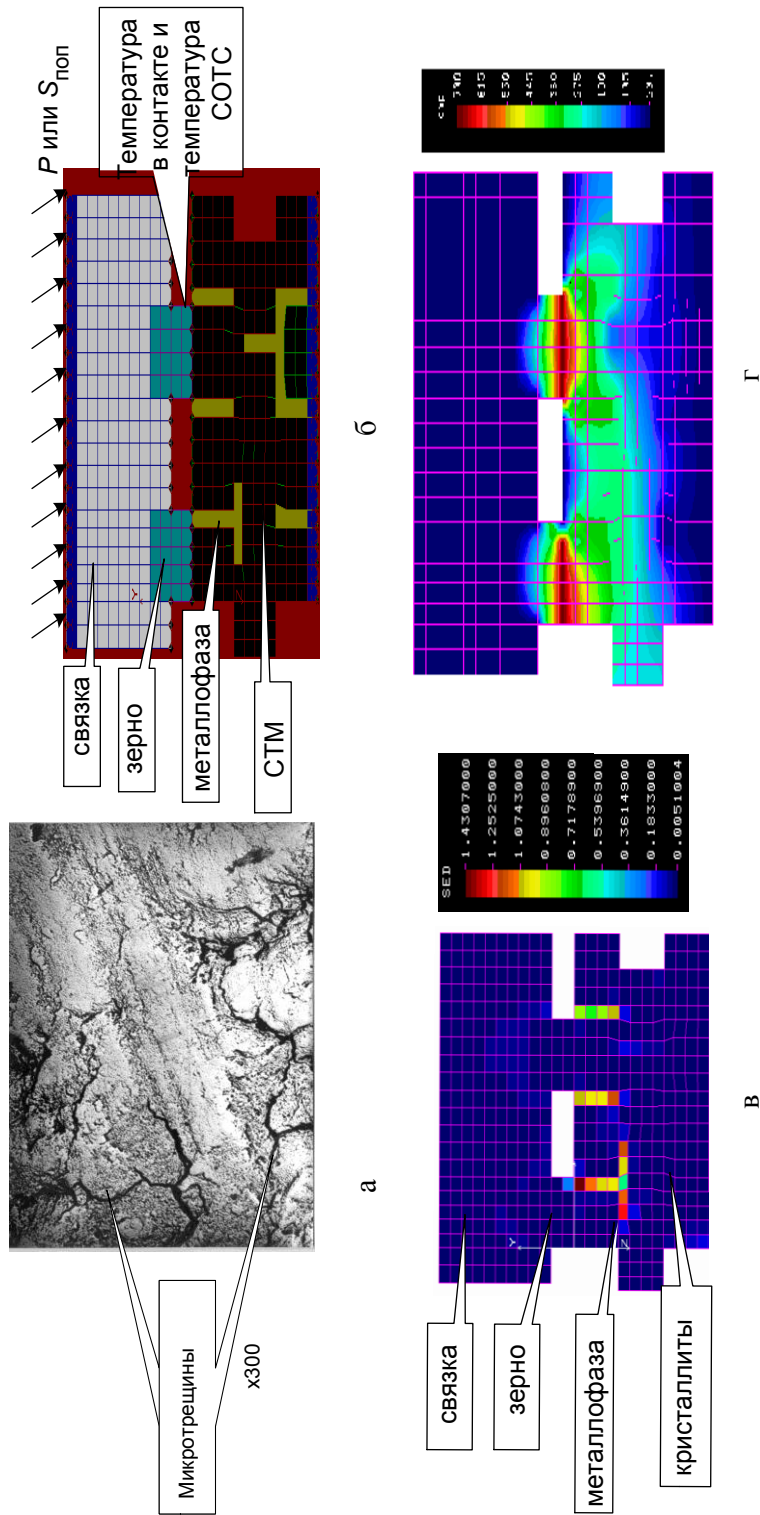


Рис. 4.10. Термосиловое 3D НДС и температурные поля в системе «кристаллиты СТМ–металлофаза–связка–зерно»:

а – дефектная поверхность СТМ; б – расчетная схема термосилового НДС;

в – энергия термосиловой деформации; г – температурные поля.

Результаты расчетов:  $\sigma_{\text{пр}} = 356 P^{0.31} \theta^{0.72} = 1834 \text{ МПа}$

По данным Н. В. Новикова  $q = \overline{K_2(\alpha_2 - \alpha_1)} \Delta T = 1445.6 \text{ МПа}$

$\sigma_{\text{пр}}$  – приведенные напряжения;  $P$  – усилия в контакте;  $\theta$  – контактная температура

Расчеты показали, что уже при температурах порядка 700 – 800°C из-за анизотропии термического расширения алмаза и различия коэффициентов термического расширения алмаза и металлов катализаторов в алмазной матрице появляются растягивающие напряжения, превышающие соответствующий предел прочности СТМ, что может являться причиной появления сетки микротрещин на обработанной поверхности, т. е. брака при заточке инструмента из СТМ.

Из проведенных расчетов определяем условия шлифования ( $S_{\text{поп}}$ ,  $P_n$ , наличие СОЖ), при которых исключается вероятность образования и развития как поверхностных, так и внутренних микротрещин

Однако, бездефектная обработка (под бездефектной обработкой, в дальнейшем будем понимать наличие дефектов допустимого количества и размеров), например, на стадии заточки лезвийного инструмента из СТМ, не всегда гарантирует его надежность в процессе эксплуатации. Очевидно, режимы заточки лезвийного инструмента из СТМ должны быть увязаны с конкретными условиями его эксплуатации (рассмотрено в гл. 8).

### Выводы

1. Эффективность любого процесса абразивной обработки определяется уровнем приспособляемости взаимодействующих поверхностей и возможностью изменения этого уровня за счет выбора условий шлифования (режимы обработки, введение в зону шлифования дополнительной энергии или ПАВ, и т. д.). При традиционном алмазном шлифовании СТМ кругами на металлических связках процесс приспособляемости реализуется аномально быстро (1 - 2 минуты) и характеризуется тремя этапами: высокоинтенсивным, переходным и устойчивым. Выдвинута доказательная гипотеза о возможности управления процессом приспособляемости для эффективного использования достоинств каждого периода всего ее диапазона и максимальной реализации высоких потенциальных возможностей процесса.

2. Сформулировано и обосновано понятие приспособляемости как способности к самоорганизации технической системы «СТМ - зерно – связка» в процессе ее функционирования, т. е. шлифования. Приспособляемость реализуется при изменении свойств элементов системы или окружающей среды.

Применительно к предметной области алмазно-абразивной обработки в качестве критерия приспособляемости может служить минимизация энергозатрат функционирования системы, приводящая к потере производительности обработки. Разработана систематика наиболее представительных составляющих процесса приспособляемости при алмазном шлифовании СТМ. Наибольшее влияние на эффективность процесса шлифовании СТМ оказывают топографическая и структурно-фазовая, а энергетическая составляющая приспособляемости является интегрирующим показателем степени их реализации. Процесс приспособляемости может осуществляться в принципиально разных условиях взаимодействия элементов системы, характеризующихся наличием или отсутствием контакта связки с обрабатываемым материалом.

3. Установлено определяющее влияние анизотропии свойств кристаллитов обрабатываемого сверхтвердого материала и алмазных зерен на степень структурно-фазовой приспособляемости. К ним относятся, прежде всего, различие значений микротвердости, энергии разрушения и прочности контактирующих тел, обусловленное их ориентацией по отношению к зоне контакта. При определении оптимальных условий производительного или прецизионного шлифования следует учитывать взаимосвязь скорости круга, размеров зерен, частоты их собственных колебаний и величины кристаллитов обрабатываемого сверхтвердого материала. Структурно-фазовую приспособляемость в процессе алмазного шлифования СТМ можно характеризовать изменяющимся количеством «твердых» и «мягких» граней кристаллитов и алмазных зерен в контакте, миграцией металлофазы в зоне контакта, вызванной анизотропией, графитизацией и окислением кристаллитов СТМ и зерен.

4. При равнотвердых обрабатываемом и инструментальном материалах наряду с твердостью большую роль играют динамическая прочность и трещиностойкость алмазных зерен, принудительное формирование субмикрорельефа алмазных зерен в сочетании с дозируемым принудительным удалением связки, наличие или отсутствие контактирования металлической связки с обрабатываемым материалом, величина фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ» как факторы, определяющие характер и интенсивность самозатачивания кругов.

При шлифовании СТМ удельный износ и удельный расход алмазов круга может различаться на порядок. Например, для пары «АСПК – зерно АС2» это отличие достигает 10 раз. Предложенные методики определения удельного износа и динамической прочности алмазных зерен непосредственно в круге поз-

воляют определять оптимальные сочетания контактирующих пар «марка СТМ – марка зерна».

5. Выдвинута гипотеза (доказательство и экспериментальное подтверждение приведено в гл. 7) о том, что, управляя уровнем приспособляемости, можно трансформировать процесс шлифования СТМ в широком диапазоне от производительного до доводочного и ультрапрецизионного, путем целенаправленного изменения и стабилизации заданного уровня приспособляемости в системе «шлифовальный круг–деталь» в любом из трех установленных этапов.



## Глава 5

### **Микроразрушение элементов системы «СТМ – зерно – связка» в процессе шлифования**

Раздел посвящен теоретическим исследованиям микроразрушения элементов системы «СТМ – зерно – связка» в процессе алмазного шлифования. Применено 3D моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) зоны шлифования и разрушения элементов системы. Определены условия, обеспечивающие рациональное распределение энергии, подводимой в зону шлифования, между элементами системы, при котором наиболее эффективно будет разрушаться объем припуска либо съем будет минимизироваться до атомно-молекулярного уровня, обеспечивая прецизионность обработки. Получены исходные данные для разработки теоретического модуля экспертной системы процесса алмазного шлифования СТМ.

#### **5.1. Факторы, определяющие съем СТМ в процессе алмазного шлифования**

Физические предпосылки эффективности алмазного шлифования СТМ обстоятельно рассмотрены в гл. 4. Здесь остановимся лишь на некоторых аспектах, связанных с процессами микроразрушения элементов 3D системы «СТМ – зерно – связка».

Обработка материалов, связанная с образованием новой поверхности, формы и размеров, требует осознанного управления процессом разрушения материала, составляющего припуск заготовки. Для случая синтетических сверхтвердых материалов на основе алмаза и нитрида бора, которые отличаются высокой твердостью, износостойкостью и хрупкостью, высокопроизводительная, качественная и экономически целесообразная обработка представляет специфическую, технологически сложную задачу и ставит ряд совершенно новых проблем, решение которых возможно в рамках теории физики разрушения.



Способность абразивных частиц внедряться в поверхностный слой и разрушать его при движении приближенно оценивают по соотношению значений микротвердости испытуемого материала  $H$  и абразива  $H_a$  [177]:

$$K_T = \frac{H}{H_a}. \quad (5.1)$$

Опытным путем установлено, что критическое значение коэффициента  $K_T = 0.5 \dots 0.7$ . При  $K_T < 0.5$  возможно прямое разрушение материала (при соответствующей форме частиц и достаточной нормальной нагрузке); при  $K_T > 0.7$  прямое разрушение маловероятно, и процесс изнашивания переходит в многоцикловый с резко снижающейся интенсивностью по мере увеличения коэффициента  $K_T$ . При алмазном шлифовании СТМ  $K_T > 0.6$  даже с учетом анизотропии физико-механических свойств СТМ и зерен.

Коэффициент  $K_T$  используем в качестве критерия для оценки перехода от прямого (одноактного) разрушения СТМ и зерен к многоцикловому (усталостно-циклическому) при нагрузках в контакте, не превышающих критическую.

Прямое разрушение микрообъемов поверхностного слоя материалов под действием абразивной частицы возможно при  $K_T < 0.5$ , т. е. когда абразив в 2 раза и более тверже изнашиваемого материала. При этом абразивная частица, как показывает опыт, обладает достаточной прочностью, чтобы довести материал до разрушения, сохранив свою целостность и, соответственно, форму.

Если критерий твердости  $K_T > 0.7$ , то прямое разрушение невозможно, так как контактный выступ частицы разрушится прежде, чем напряжения в деформируемом микрообъеме материала достигнут предельного значения.

Критерий твердости  $K_T$  потому и используется в качестве одного из важнейших показателей при моделировании абразивного изнашивания, что его значения позволяют априорно установить возможный вид разрушения материала. Чем  $K_T > 0.7$ , тем ниже уровень контактных напряжений и тем слабее интенсивность изнашивания материала. В случае алмазного шлифования СТМ варьирование величиной коэффициента  $K_T$  возможно только за счет анизотропии свойств контактирующих элементов. Алмазные зерна круга и шлифуемый алмазный поликристалл имеют примерно равные твердости. Но так как отдельные кристаллиты произвольно ориентированы, то с учетом существенной ани-

**Примечание [V313]:** Стр: 153  
[a№3039] Тененбаум М.М. Сопротивле-  
ние абразивному изнашиванию. - М.:  
Машиностроение, 1976. - 271 с. {Book:  
Date 03/09/02 Time 16:36:00}

зотропии свойств кристаллитов СТМ и алмазных зерен можно ожидать такого сочетания ориентаций, когда реализуется превышение твердости режущего зерна над обрабатываемым поликристаллом.

В результате аномально быстрой топографической приспособляемости рабочей поверхности алмазных кругов зона нагружения участков поверхности поликристаллов каждым уплотненным зерном резко возрастает и энергия поглощается существенно большими объемами СТМ, что уже само по себе исключает интенсивный съем, соответствующий начальному периоду шлифования при сохранении внешних условий неизменными. В связи с этим доля энергии, идущей на разрушение обрабатываемого материала, уменьшается, а доля энергии, идущей на изменение в обрабатываемом материале, возрастает.

Известно, что в основе разрушения алмаза в процессе его обработки лежит механическое, термическое, химическое или физико-химическое воздействие. Возможны также различные комбинации этих воздействий [33, 60]. Анализ известных способов обработки природных алмазов и определенное совпадение их основных физико-механических свойств со свойствами АСБ, АСПК, СВ с одной стороны, основных закономерностей алмазного, электроалмазного и ультразвукового шлифования [103], специфических свойств СТМ – с другой привел к выводу о том, что именно в условиях шлифования алмазными кругами создаются предпосылки, необходимые для одновременной реализации всех или большинства указанных выше видов разрушающего воздействия на СТМ.

Алмазное шлифование базируется на массовом воздействии твердых и острых алмазных зерен на обрабатываемый объект, при этом скорость движения этих зерен, их количество, сила воздействия поддаются регулированию в широком диапазоне значений. Выявлена важная роль субмикрорельефа алмазных зерен.

Изучение субмикрогеометрии алмазных зерен [165] показало, что острота их вершин (ребер) столь велика, что при воздействии на обрабатываемый материал создаются очень узкие зоны с высокой концентрацией эффективных напряжений. Конфигурация этих зон зависит во многом от характера контакта – по вершине, по ребру, от типа кристаллографической площадки. Это требует рассмотрения 3-х мерной задачи.

При появлении и массовом воздействии площадок износа зерен и связки шлифовального круга в третьем периоде возрастает роль тепловых процессов, усиливающих термоактивируемые явления.

**Примечание [V314]:** Стр: 154  
[a№284] Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. - Харьков: Вища шк., 1985. - 184 с. {Book: Date 03/09/02 Time 16:37:15}

**Примечание [V315]:** Стр: 154  
[a№3061] Епифанов В.И., Песина А.Я., Зыков Л.В. Технология обработки алмазов в бриллианты. - М.: Высш. шк., 1984. - 319 с. {Book: Date 03/09/02 Time 16:36:43}

**Примечание [V316]:** Стр: 154  
[a№3251] Марков А.И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов. - М.: Машиностроение, 1968. - 367 с. {Book: Date 03/09/02 Time 16:37:43}

**Примечание [V317]:** Стр: 154  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 03/09/02 Time 16:38:14}

С точки зрения соотношения «горячей» твердости в реальном процессе, когда поликристалл находится длительное время в постоянном контакте с рабочей поверхностью круга, превышение твердости режущего алмазного зерна проявится для большего числа кристаллитов. По данным Л. Ф. Верещагина [21] при нагреве алмазов АСБ до 400–600°С производительность их обработки увеличивается в 5 – 6 раз.

При трении алмаза по алмазу могут возникнуть высокотемпературные вспышки, приводящие к превращению тончайших слоев алмаза в графит, а также способствующие протеканию окислительного процесса. Самопроизвольный фазовый переход алмаза в графит происходит при температуре выше 1773°К, которая соответствует условиям разрыва связей атомов в кристаллической решетке. Графитизация протекает с увеличением объема в 1.5 раза, поэтому графит образуется на поверхности алмазных зерен. Скорость графитизации в различных кристаллографических направлениях различна. Наибольшее сопротивление графитизации оказывают грани (001), наименьшее – грани (110) [2, 235]. Следовательно, тепловое и химическое разрушающие воздействия на алмаз тесно связаны.

Вклад каждого из рассмотренных факторов в общий съем шлифуемого СТМ и другие выходные показатели определяется тем, как функционирует вся система «СТМ–зерно–связка». Дифференцированный подход, применявшийся другими исследователями [9, 109] к изучению явлений, протекающих в зоне шлифования, нивелирует выявление роли элементов системы, в частности, связки, влияния ее свойств, и всей композиции, составляющей алмазоносный слой.

Интенсивность съема всецело будет зависеть от микроразрушения поликристалла при соударении с алмазными зернами круга и скольжении последних по поверхности в их относительном перемещении. Эти выводы дают основание рассматривать алмазное шлифование СТМ как структурно чувствительный процесс управляемого микроразрушения, обеспечивающего получение деталей заданной формы, размеров и качества. Задача управления микроразрушением состоит в том, чтобы ограничить зону микроразрушения объемами, составляющими припуск под обработку, исключить возможность распространения микротрещин и других дефектов в объемы поверхностного слоя детали, максимально использовать сопутствующие явления для интенсификации съема припуска.

**Примечание [V318]:** Стр: 155  
[a№3313] Верещагин Л.Ф. Синтетические алмазы и гидроэрозия. - М.: Наука, 1982. - 328 с. {Book: Date 03/09/02 Time 16:38:40}

**Примечание [V319]:** Стр: 155  
[a№3063] Алмаз : Справочник / Д.В. Федосеев, Н.В. Новиков, А.С. Вишневский и др. - Киев: Наук. думка, 1981. - 76 с. {Book: Date 03/09/02 Time 16:39:10}

**Примечание [V320]:** Стр: 155  
[a№3150] Schmitt M., Paulmier D., LeHu T. Influence of Diamond Crystals Orientation of their Tribological Behaviour under various environments // 14th International Vacuum Congress. - 1998, Birmingham. {Book: Date 31/08/02 Time 11:25:29}

**Примечание [V321]:** Стр: 155  
[a№1067] Беззубенко Н.К. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов: Дис... докт. техн. наук: 05.03.01. - Харьков, 1996. - 468 с. {Book: Date 03/09/02 Time 21:31:06}

**Примечание [V322]:** Стр: 155  
[a№44] Мишнаевский Л.Л. Износ шлифовальных кругов. - К.: Наукова думка, 1982. - 192 с. {Book: Date 03/09/02 Time 21:30:22}

Шлифование состоит в массовом динамическом воздействии алмазных зерен круга на обрабатываемый поликристалл. Воздействие осуществляется выступающими элементами субмикрорельефа алмазных зерен. Из-за исчезающе малых радиусов этих выступов – микрокромки и высокого модуля упругости размеры пятен упругого контакта также чрезвычайно малы [165]. Возникают микрозоны с исключительно высокими местными напряжениями.

На основании структурно-эмпирического подхода можно констатировать, что высокопроизводительный съем материала, составляющего припуск под обработку, достижим в том случае, если вся подводимая зерном энергия затрачивается на снимаемые объемы, а не на сопутствующие явления. Так как образование новых поверхностей связано с превышением энергии межатомной связи, то локализация зоны разрушения будет обуславливать и уменьшение объемов, в которых протекают сопутствующие явления, а, значит, снижение энергии, затрачиваемой на съем единицы объема материала.

Как уже отмечалось, сущность энергетической приспособляемости состоит в том, что топография, структура и свойства дискретной алмазной поверхности круга и квазисплошной СТМ в процессе высокоскоростного контактирования перестраиваются в направлении, энергетически более выгодном в сравнении с исходным состоянием.

Подводимая в зону шлифования энергия распределяется между элементами системы «СТМ–зерно–связка»:

$$E = E_{\text{СТМ}} + E_{\text{св}} + E_3, \quad (5.2)$$

где  $E$  – подводимая в зону шлифования энергия;

$E_{\text{СТМ}}$  – энергия, поглощенная СТМ;

$E_{\text{св}}$  – энергия, поглощенная связкой;

$E_3$  – энергия, поглощенная зерном.

Поскольку возможности пакета программ для расчета по методу конечных элементов позволяют определять энергию и плотность энергии деформации в каждом отдельном элементе конечноэлементной сетки 3D модели  $E^1$ , зависимость (5.2) можно представить в виде:

$$E = V_{\text{СТМ}} E_{\text{СТМ}}^1 + V_3 E_3^1 + V_{\text{св}} E_{\text{св}}^1, \quad (5.3)$$

где  $E_3^1$  – плотность энергии деформации в конечных элементах зерна;

$E_{\text{СТМ}}^1$  – плотность энергии деформации в конечных элементах СТМ;

**Примечание [V323]:** Стр: 156  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И.,  
Ходоревский М.Г. Алмазное шлифова-  
ние синтетических сверхтвердых мате-  
риалов. - Харьков: Вища школа, 1980. -  
192 с. {Book: Date 24/08/02 Time  
21:37:26}

---

$E_{\text{св}}^1$  – плотность энергии деформации в конечных элементах связки;

$V_{\text{СТМ}}$ ,  $V_{\text{св}}$ ,  $V_3$ , – объемы конечных элементов СТМ, связки и зерна, в которых произошли изменения энергии деформации.

В дальнейшем объемы разрушенных СТМ и зерен  $V_p$  будем определять как сумму объемов элементов конечноэлементной сетки 3D модели зерна и СТМ, в которых энергия деформации и/или приведенные напряжения превысили критические для данного материала значения.

Необходимо проведение теоретико-экспериментального изучения процессов разрушения и взаимодействия всех элементов системы «СТМ – зерно – связка», которое позволит определить роль физико-механических свойств ее элементов, влияние топографических параметров взаимодействующих поверхностей и условий нагружения (режимов шлифования) на функционирование данной системы, что в полной мере определяет эффективность алмазного шлифования СТМ.

## **5.2. Методология 3D моделирования напряженно-деформированного состояния зоны шлифования**

В качестве системы рассматривается не плоская, а трехмерная (3D) модель зоны шлифования, причем связка, зерно и СТМ рассматриваются как единая техническая система, функционирование которой полностью определяет эффективность процесса шлифования. Именно такой подход позволяет в условиях, максимально приближенных к реальным, вскрыть взаимовлияние элементов системы «СТМ–зерно–связка», физико-механических свойств алмазных зерен, связки и обрабатываемого материала, топографии контактирующих поверхностей, режимов шлифования (нагружения системы). Такой комплексный подход к изучению зоны шлифования как единого целого в трехмерном измерении стал реальным только с использованием возможностей современной вычислительной техники и, в частности, пакетов прикладных программ для метода конечных элементов.

Особенности строения СТМ: анизотропия свойств, наличие дефектности структуры и ее многофазность делают затруднительными и некорректными применение для анализа напряженно-деформированного состояния системы «СТМ – зерно – связка» классических методов теории упругости. Наиболее эф-

фективным для этого является метод конечных элементов (МКЭ) [16, 61], при котором непрерывная (упругая) среда заменяется на конечное количество дискретных элементов, связанных друг с другом в узловых точках конечным числом узловых связей. Свойства упругой среды при определении деформаций сохраняются в каждом ее элементе.

Возможности изучения НДС зоны шлифования в 3-х мерном (объемном) измерении (3D модель) существенно приближают результаты теоретических расчетов к реальности. Например, при плоском решении задачи не представляется возможным разделить контакт зерна вершиной или ребром, т. к. расчетные схемы в этом случае идентичны. Сравнительные расчеты НДС системы «СТМ – зерно – связка» в плоском и 3D варианте показали, что расхождение результатов может достигать 50 – 150 %.

Еще одним достоинством 3D моделирования НДС системы «СТМ – зерно – связка» как единого целого является возможность моделировать процесс алмазного шлифования по жесткой схеме, т. е. с поперечной подачей. При этом НДС создается не путем приложения нагрузки к алмазному зерну, как это обычно делалось, а заданием перемещения алмазоносного слоя на обрабатываемый материал. Такая расчетная схема полностью соответствует процессу шлифования с поперечной подачей в реальном процессе алмазного шлифования СТМ по жесткой схеме.

В работах Института сверхтвердых материалов НАН Украины [119, 122, 169] рассмотрена возможность расчета напряженно-деформированного состояния кристаллов алмазов различной формы методом конечных элементов. Он развит применительно к трехмерным задачам теории упругости для анизотропных сред. Приведенный в работе [117] расчет напряжений в алмазе кубооктаэдрической формы при сжатии [001] позволил установить, что напряженное состояние кристаллов далеко от однородного сжатия. Большие градиенты напряжений имеют место как в направлении оси сжатия, так и в перпендикулярных к ней плоскостях. Возникают значительные поперечные напряжения, сжимающие в приконтактных областях и растягивающие в средней части кристалла. Именно действием этих растягивающих напряжений можно объяснить разрушение кристаллов по плоскостям (110) и  $(\bar{1}\bar{1}0)$  при сжатии в направлении [001]. Эти результаты подтверждают необходимость учета анизотропии свойств при исследовании процессов разрушения алмазных структур. Расчет и анализ напряженно-деформированного состояния кристаллов различной формы позволяют перейти при оценке процесса их разрушения от характеристики разруша-

**Примечание [V324]:** Стр: 158  
[a№3071] Броек Д. Основы механики разрушения. - М.: Высшая школа, 1980. - 368 с. {Book: Date 31/08/02 Time 11:35:05}

**Примечание [V325]:** Стр: 158  
[a№3328] Ефимов Ю.Н., Сапожников Д.Б. Реализация методов конечных элементов на ЭВМ для решения плоской задачи теории упругости. - Известия / Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники, 1970, т. 93, с. 81-101 {Book: Date 03/09/02 Time 21:31:50}

**Примечание [V326]:** Стр: 158  
[a№3013] Новиков Н.В., Дуб С.Н., Мальнев В.И. Трещиностойкость монокристаллов алмаза // Сверхтвердые материалы. - 1992. - № 5. С. 6-11. {Book: Date 03/09/02 Time 21:32:54}

**Примечание [V327]:** Стр: 158  
[a№3057] Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н. Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов. - Киев: Наук. думка, 1993. - 220 с. {Book: Date 03/09/02 Time 21:33:56}

**Примечание [V328]:** Стр: 158  
[a№1091] Синтетические сверхтвердые материалы: В 3 т. / Редкол: Н.В. Новиков... - Киев: Наук. думка, 1986. - Т.2: Композиционные инструментальные СМ. - 262 с. {Book: Date 03/09/02 Time 21:33:29}

**Примечание [V329]:** Стр: 158  
[a№3059] Новиков Н.В., Воронин Г.А. Расчет напряженно-деформированного состояния кристаллов синтетических алмазов методом конечных элементов // Сверхтвердые материалы. - 1983. - № 1. - С. 13-16. {Book: Date 03/09/02 Time 21:34:28}

ющих усилий к более обоснованным значениям предельных напряжений или предельной энергии деформации. Практически идеальная хрупкость взаимодействующих материалов позволяет предполагать, что разрушение объемов материала будет происходить при условии появления в них закритических значений приведенных напряжений и/или закритической энергии (плотности энергии) деформации, значения которых могут быть получены методом конечных элементов. Это дает возможность количественно оценивать влияние физико-механических свойств СТМ и алмазных зерен (с учетом их анизотропии), условий нагружения системы, различных дефектов строения СТМ на характер и интенсивность их разрушения. В рамках решаемой задачи определено влияние условий нагружения геометрических параметров элементов и их ориентации по отношению к зоне контакта, физико-механических свойств зерна, СТМ, связки на величину и распределение главных и приведенных напряжений, упругих деформаций, энергии и плотности энергии деформации, частоту собственных колебаний алмазных зерен.

Цель теоретических исследований – разработка теоретического модуля экспертной системы процесса алмазного шлифования СТМ. Ее назначение – сократить объем трудоемких и дорогостоящих экспериментов.

Интенсивность микроразрушения алмазных зерен и припуска СТМ в значительной степени обуславливается их прочностными характеристиками. Наиболее ответственными из них являются предел прочности при растяжении  $\sigma_p$ , т. к. в большинстве случаев разрушение СТМ и зерен наступает в зонах максимальных растягивающих напряжений и коэффициента интенсивности напряжений  $K_{IC}$ . Сложность экспериментального определения этих показателей обусловлена малыми размерами как СТМ, так и алмазных зерен и сложностью изготовления образцов требуемых размеров. Наиболее полно эта проблема решена в работах Л. Н. Девина [46] и С. Н. Дуба [57]. Получена зависимость для определения предела прочности СТМ при растяжении:

$$\sigma_p \approx \frac{0.41\sigma_k\sigma_c}{\sigma_c - 1.89\sigma_k}, \quad (5.4)$$

где  $\sigma_k = \frac{P}{dh}$  – средняя прочность при диаметральной сжатии образца диаметром  $d$  высотой  $h$  разрушающим усилием  $P$ ;  
 $\sigma_c$  – предел прочности при одноосном сжатии.

**Примечание [V330]:** Стр: 159  
 [a№3005] Девин Л.Н. Определение предела прочности при растяжении поликристаллических сверхтвердых материалов // Сверхтвердые материалы. - 1988. - № 2. - С. 24-28. {Book: Date 03/09/02 Time 21:35:00}

**Примечание [V331]:** Стр: 159  
 [a№3236] Дуб С.Н., Эпштейн В.М., Никифоров Г.С. Механические свойства поликристаллического алмаза // Сверхтвердые материалы. - 1993. - №2. - С. 18-21. {Book: Date 19/04/02 Time 21:43:36}



Исходя из данных о прочности алмазных зерен при статическом сжатии, можно определить  $\sigma_k$  для каждой зернистости. Эти зависимости использованы нами при определении значений предела прочности при растяжении  $[\sigma_p]$  всех исследуемых СТМ и алмазных зерен. Поскольку СТМ относятся к практически идеально хрупким материалам, будем считать, что объем материала, в котором приведенные напряжения и/или плотность энергии деформации превысит предельные значения, разрушится.

3D моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «СТМ–зерно–связка» и ее элементов осуществляли с целью количественной оценки влияния условий шлифования – поперечная подача  $S_{\text{поп}}$ , нормальное давление  $P_n$ , скорость шлифования  $V$ , характеристик кругов – зернистость  $z$ , концентрация алмазов в круге  $K$ , марки СТМ и алмазных зерен, марки металлической связки, наличие металлофазы на интенсивности взаимного разрушения элементов системы.

На рис. 5.1 приведена систематика видов разрушения элементов системы «СТМ – алмазное зерно – связка», определяющих эффективность алмазного шлифования СТМ, которая свидетельствует о сложности и взаимосвязанности явлений, протекающих в зоне резания.

Поскольку наиболее распространенной формой кристаллитов (монокристаллов) алмаза считается октаэдр, частицы (продукты) разрушения алмаза имеют такую же форму [60], то и форму 3D конечных элементов в МКЭ принимали в виде октаэдра.

Возможности современных ЭВМ позволяют вести расчет при размерах конечных элементов сетки, составляющих сотые доли микрометра, что вполне соизмеримо с реальными объемами диспергирования зерен и СТМ в процессе шлифования. Расчетная сетка сгущалась по мере приближения к месту приложения нагрузки.

Предлагаемый подход оценки НДС зоны шлифования и, как следствие, интенсивности съема припуска и износа зерен может быть использован в том случае, когда контактные нагрузки достаточны для одноактного взаимного разрушения элементов системы «СТМ – зерно – связка». В противном случае будет использована теория механики усталостно–циклического разрушения элементов системы. Об адекватности разработанной модели можно судить по степени соответствия прогнозируемых объемов разрушенных и выпавших алмазных зерен и объемов разрушенных СТМ, а также развития дефектного слоя,

**Примечание [V332]:** Стр: 160  
[a№3061] Епифанов В.И., Песина А.А.,  
Зыков Л.В. Технология обработки алма-  
зов в бриллианты. - М.: Высш. шк., 1984.  
- 319 с. {Book: Date 03/09/02 Time  
21:35:38}



обусловленного обработкой, конкретным результатам, полученным при экспериментальных исследованиях. Проверка полученных результатов реализуется в экспериментальном модуле экспертной системы.

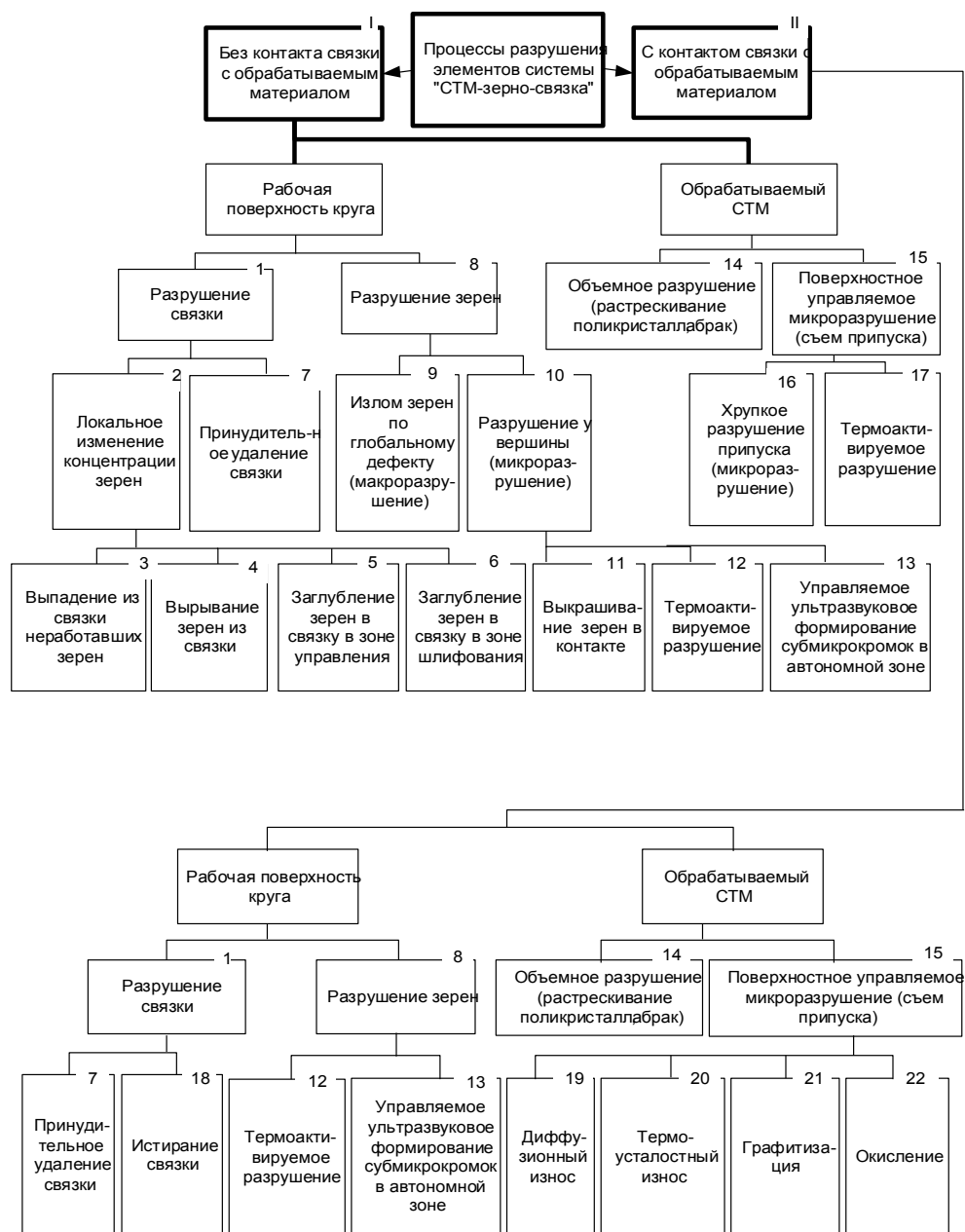


Рис. 5.1. Систематика видов разрушения элементов системы «СТМ-зерно-связка» в процессе шлифования

При моделировании приняты следующие допущения:

1. Обрабатываемый материал абсолютно хрупкий, под нагрузкой деформируется упруго вплоть до разрушения.

2. Обрабатываемый материал относится к классу СТМ, обладает дефектностью структуры в виде пор и включений металлофазы размером 5 – 10 мкм, равномерно расположенных в объеме образца.

3. Контурная площадь контакта в системе «СТМ – РПК» определяется схемой шлифования, а фактическая площадь контакта – профилем макро- и микрогеометрий РПК с учетом ее износа и шероховатости поверхности СТМ.

4. Алмазные зерна равномерно распределены по поверхности круга, контактирующей с СТМ, разновысотность зерен подчиняется равномерному закону. Алмазные зерна имеют форму октаэдра и контактируют с обрабатываемой поверхностью вершиной, ребром, гранью или их совокупностью. Контактное взаимодействие зерна с СТМ вершиной, ребром или гранью принимается равновероятным. Изменение фактической площади контакта происходит не за счет возникновения площадок смятия, а за счет упругого заглубления зерен в связку.

5. Объем материала считается разрушенным, если величина приведенных или главных напряжений в нем превысит предел его прочности на растяжение, либо энергия деформации в этом элементе превысит значения поверхностной энергии, которая для различных граней кристаллитов колеблется в пределах от 18.4 до 10.6 дж/м<sup>2</sup> [165].

В зависимости от поставленных целей исследований варьируется степень детализации изучаемых процессов и изменяются используемые методы и методики решения задач.

### 5.3. Исследование 3D напряженно-деформированного состояния системы «СТМ – зерно – связка»

Механизм съема припуска при взаимодействии элементов системы «СТМ–зерно–связка» изучался при нагружении силой шлифования либо величиной поперечной подачи, обеспечивающей по данным эксперимента изменение состояния СТМ в зоне шлифования от упругого деформирования до разрушения. Характер нагружения принят статическим, однако, величина его рассчитывалась с учетом динамического характера взаимодействия и корректировалась по экспериментальным данным.

**Примечание [V333]:** Стр: 162  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И.,  
Ходоревский М.Г. Алмазное шлифова-  
ние синтетических сверхтвердых мате-  
риалов. - Харьков: Вища школа, 1980. -  
192 с. {Book: Date 03/09/02 Time  
21:36:39}

Приближенно оценить силу взаимодействия можно, воспользовавшись теорией соударения шаров, изложенной в [51].

Основной гипотезой этой теории является предположение о том, что свойства и размеры соударяющихся тел различаются не слишком сильно. Для таких тел время соударения очень велико по сравнению с периодом низшей формы их колебаний.

В данном случае одно из тел (СТМ) можно представить как шар бесконечно больших радиуса и массы. В этом случае период низшей формы колебаний становится очень большим, стремясь к бесконечности. Однако и в этом случае экспериментально определённая продолжительность соударения достаточно хорошо согласуется с результатами указанной теории [204].

Для случая, когда условный радиус округления зерна  $R_2 = 100$  мкм, скорость круга  $V = 30$  м/с, модули упругости зерен и СТМ  $E = 800$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0.1$ , масса зерна  $m_2 = 0.1$  г получаем  $P_{\max} = 0.28$  Н. По данной методике рассчитывалась величина силового нагружения системы «СТМ – зерно – связка» и корректировалась по результатам экспериментального определения сил резания и коэффициента шлифования при обработке различных марок СТМ.

Варьировалось направление действия результирующей силы шлифования по отношению к обрабатываемой поверхности от нормали (тангенциальная составляющая силы резания  $P_z = 0$ , разрушение материала происходит только под воздействием нормальной составляющей  $P_y$ ) до направления, обусловленного соотношением сил  $P_z / P_y = 0.1 - 0.4$ , что по данным экспериментов характерно для обработки сверхтвердых материалов.

В результате расчетов были получены значения перемещений в узлах и напряжений в элементах сетки. Для получения более полной картины 3D НДС наиболее нагруженной зоны контакта шаг сетки был уменьшен до 0.0005 мм по мере приближения к зоне контакта. При исследовании взаимодействия зерна с поликристаллом рассматриваются модели, в которых связка, зерно и поликристалл полагаются упругими сплошными телами.

Связка и поликристалл представляются в виде призматических фрагментов с размерами соответственно  $2 \times 2 \times 3$  мм и  $1 \times 1 \times 2$  мм, а зерно – в виде октаэдра с размерами  $200 \times 150 \times 150$  мкм, что позволяет достаточно точно моделировать деформирование фрагментов модели с учетом удаленности зон.

**Примечание [V334]:** Стр: 163  
[a№550] Динамика удара: Пер. с англ. / Зукас Дж. А., Николас Т., Свифт Х.В., Джонсон В.Л. и др. - М.: Мир, 1985. - 296 с. {Book: Date 03/09/02 Time 21:37:04}

**Примечание [V335]:** Стр: 163  
[a№3193] Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. - М.: Наука, 1974. - 640 с. {Book: Date 03/09/02 Time 21:37:51}

В качестве возможных вариантов ориентации зерна относительно поликристалла рассматриваются три: контакт зерна с поликристаллом по вершине зерна, ребру и плоскости. При изучении совместной работы зерен рассматривались различные вариации соотношений их количества по-разному ориентированных к зоне контакта.

Далее рассмотрено деформирование модели при этих ориентациях зерна и влияние упругих характеристик элементов модели на ее НДС.

### 5.3.1. 3D НДС зоны шлифования при точечном контакте зерна

Оценка напряженно-деформированного состояния системы «СТМ–зерно–связка» проводилась с использованием пакета программ для метода конечных элементов с применением восьми узловых элементов SOLID (4847 узлов, 1640 элементов) (рис. 5.2 а).

Поликристалл закреплялся по нижней грани по линейным перемещениям  $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$ . Сгенерированная конечноэлементная сетка модели приведена на рис. 5.2 б.

Характеристики материала элементов модели: зерно  $E = 1000$  ГПа;  $G = 545$  ГПа;  $\mu = 0.1$ ; поликристалл  $E = 1000$  ГПа;  $G = 545$  ГПа;  $\mu = 0.1$ ; связка  $E = 72$  ГПа;  $G = 28$  ГПа;  $\mu = 0.24$  (алюминиевый сплав).

Нагружение модели производилось по двум вариантам:

- заданием перемещения  $U_y$  верхней плоскости связки (кинематическое воздействие) – имитация поперечной подачи при жесткой схеме шлифования;
- приложением давления к верхней плоскости связки (силовое воздействие) – упругая схема шлифования.

В качестве реакции модели на нагружение приняты:

- перемещение узла (№ 29) контакта зерна с поликристаллом  $U_y^3$ ;
- напряжения (приведенные по Мизесу) в узле (№ 29) контакта зерна с поликристаллом  $\sigma_{von}$ ;
- напряжения (приведенные по Мизесу) в узле (№ 1) контакта связки с зерном  $\sigma_{von}$ .

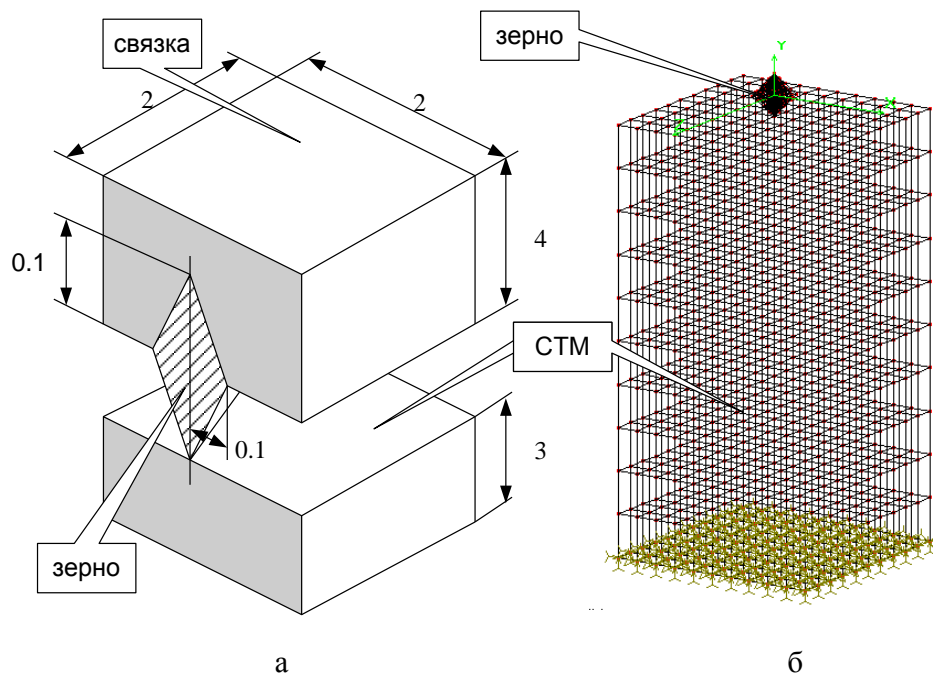


Рис. 5.2. Модель взаимодействия элементов системы (а) и ее сгенерированная конечноэлементная сетка (б) при точечном контакте зерна с СТМ

При перемещении алмазного слоя на  $U_y^c = 5$  мкм получили величину упругого перемещения зерна в СТМ  $U_y^3 = 0.473$  мкм; при этом напряжения в зерне (поликристалле)  $\sigma_{von} = 14717$  МПа, а напряжения в связке  $\sigma_{von} = 4620$  МПа.

При приложении к связке давления  $p = 10$  МПа соответствующего усилию  $P = 0.4$  Н получаем:

- перемещение зерна  $U_y^3 = 0.2718$  мкм;
- напряжения в зерне (поликристалле)  $\sigma_{von} = 8452$  МПа;
- напряжения в связке  $\sigma_{von} = 2653$  МПа.

Картина распределения приведенных напряжений в базовой модели системы «СТМ–зерно» при перемещении связки  $U_y^c = 5$  мкм приведена на рис. 5.3.

При этом в 365 элементах зерна и в 236 элементах СТМ энергия деформации превысит критическое значение и объемы разрушенного зерна и поликристалла составят соответственно  $V_z = 0.023 \text{ мкм}^3$  и  $V_{\text{СТМ}} = 0.018 \text{ мкм}^3$ .

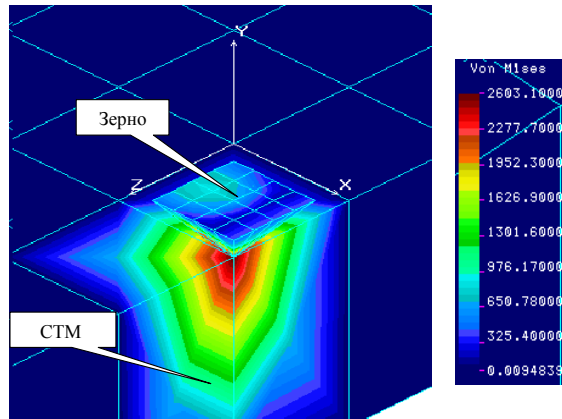


Рис. 5.3. 3D поля приведенных напряжений в системе «зерно–СТМ» при точечном контакте зерна с СТМ

Соответствие между кинематическим и силовым воздействием модели выражается зависимостями:

из условия равенства напряжений в зерне (поликристалле):

$$P = 13.93 U_y^c, \quad (5.5)$$

где  $P$  – усилие в Н;  $U_y$  – перемещение в мкм;

из условия равенства напряжений в связке:

$$P = 13.93 U_y^c; \quad (5.6)$$

из условий равенства перемещений на границе зерно – поликристалл:

$$P = 13.93 U_y^c. \quad (5.7)$$

Зависимости (5.5)–(5.7) свидетельствуют о практически полном соответствии поведения модели при силовых и кинематических воздействиях в принятых точках для дальнейшего анализа. Далее принята зависимость  $P = 13.93 U_y^c$ , соответствующая критериям (5.5)–(5.7).

С использованием описанной выше модели анализировалось влияние свойств связки, зерна и поликристалла на процесс деформирования.

Выявленное соответствие реакции модели на кинематические и силовые воздействия позволило рассматривать один вид воздействия – нагружение перемещением связки  $U_y^c = 5$  мкм, что практически соответствует величине поперечной подачи  $S_{\text{поп}}$ .

Анализ поведения модели проводился для следующих физико-механических характеристик элементов системы «СТМ – зерно–связка»: связка: модуль упругости  $E = 72$  ГПа;  $G = 28$  ГПа; коэффициент Пуассона  $\mu = 0.24$  (базовый вариант);  $E = 100$  ГПа;  $G = 40$  ГПа;  $\mu = 0.24$ ;  $E = 130$  ГПа;  $G = 50$  ГПа;  $\mu = 0.24$ ; зерно:  $E = 1000$  ГПа;  $G = 454$  ГПа;  $\mu = 0.1$  (базовый вариант);  $E = 800$  ГПа;  $G = 360$  ГПа;  $\mu = 0.1$ ; поликристалл:  $E = 1000$  ГПа;  $G = 545$  ГПа;  $\mu = 0.1$  (базовый вариант);  $E = 800$  ГПа;  $G = 360$  ГПа;  $\mu = 0.1$ ;  $E = 500$  ГПа;  $G = 227$  ГПа;  $\mu = 0.1$ .

Сравнительный анализ поведения 3D модели при нагружении производился относительно базового варианта.

Результаты расчета 3D НДС для модели с точечным контактом вершины зерна с поликристаллом приведены в табл. 5.1. Анализ этих данных показывает, что наиболее эффективным способом повышения величины напряжений в поликристалле является повышение жесткости связки:

$$\frac{\Delta U_y^3}{\Delta E_{св}} = 0.00222 \text{ мкм/ГПа},$$

что на порядок больше, чем при повышении жесткости зерна:

$$\frac{\Delta U_y^3}{\Delta E_3} = 0.00023 \text{ мкм/ГПа}.$$

Причем, этот способ управления процессом остается эффективным в широком диапазоне изменения характеристик поликристалла:

$$\frac{\Delta U_y^3}{\Delta E_{пк}} = 0.00045 \text{ мкм/ГПа}.$$

Таблица 5.1 – 3D НДС в характерных точках конечноэлементной модели при точечном контакте зерна (вершиной)

	Базовый вариант	Связка		СТМ		Зерно
		$E = 100$ ГПа	$E = 130$ ГПа	$E = 800$ ГПа	$E = 1000$ ГПа	$E = 800$ ГПа
$U_y^{\text{зер}}$ , мкм	0.473	0.546	0.602	0.307	0.248	0.427
$\sigma_{пк}$ , МПа	14717	17125	19000	15230	15448	13363
$\sigma_{св}$ , МПа	4620	5314	5817	4790	4849	4164



Модуль упругости связки является определяющим среди характеристик фрагментов системы и при оценке их влияния на напряжения в поликристалле (в точке контакта с зерном). Такой результат открывает новые возможности повышения эффективности алмазного шлифования СТМ за счет увеличения модуля упругости связки.

Градиент роста этих напряжений наиболее значителен при изменении жесткости связки:

$$\frac{\Delta\sigma_{\text{ПК}}}{\Delta E_{\text{св}}} = 0.0738.$$

Причем он отличается примерно на порядок соответственно от градиентов изменения модуля упругости зерна (0.00677) и поликристалла (0.00146).

Напряжения в связке (в контакте с вершиной зерна) также в наибольшей мере зависят от модуля ее упругости:

$$\frac{\Delta\sigma_{\text{св}}}{\Delta E_{\text{св}}} = 0.0206.$$

Влияние на них жесткости самого зерна и поликристалла практически не существенно для рассматриваемых диапазонов характеристик составляющих модели (соответственно 0.0023 и 0.00046).

Таким образом, анализ поведения модели позволяет утверждать, что ее НДС при контакте зерна с поликристаллом в вершине зависит в основном от свойств материала связки как основного элемента рассмотренной модели.

### 5.3.2. 3D НДС зоны шлифования при линейном контакте зерна

3D модель взаимодействия зерна с поликристаллом при линейном контакте (по ребру) представлена на рис. 5.4 а. Для этой модели было сгенерировано 2248 элементов типа SOLID, 8761 узел (рис. 5.4 б).

Условия закрепления, характеристика материала фрагментов и варианты нагружения соответствовали принятым в модели при контакте зерна с поликристаллом по вершине. В качестве реакции модели на нагружение принимались: – перемещение узла (№ 98) контакта зерна с поликристаллом  $U_y$ ; – напряжения (приведенные по Мизесу) в узле (№ 98) контакта зерна с поликристаллом  $\sigma_{\text{von}}$ ; – напряжения (приведенные по Мизесу) в узле (№ 16) контакта связки с зерном  $\sigma_{\text{von}}$ .

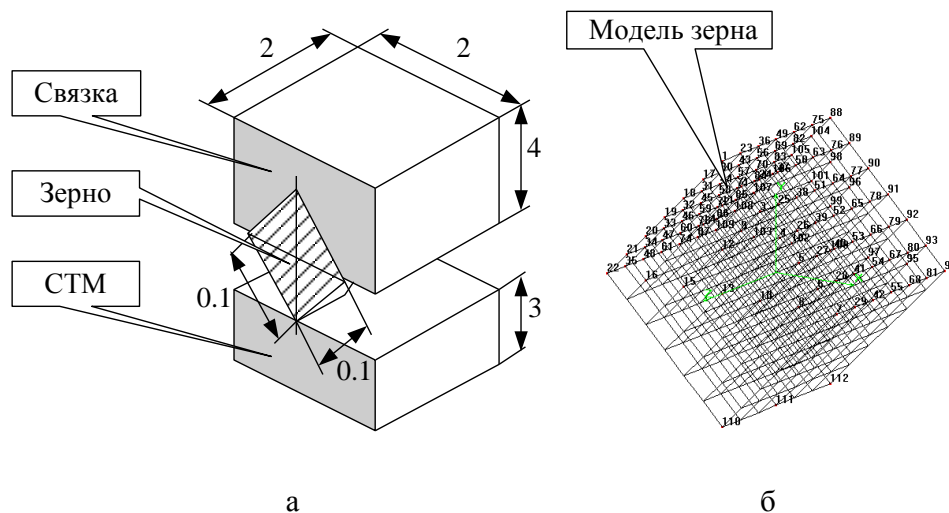


Рис. 5.4. Модель взаимодействия элементов системы  
при линейном контакте зерна с СТМ (а) и конечноэлементная сетка (б)

При перемещении алмазоносного слоя на величину  $U_y^c = 5$  мкм получили: перемещение зерна  $U_y^3 = 0.5638$  мкм; напряжения в зерне (поликристалле)  $\sigma_{von} = 4448.4$  МПа; напряжения в связке  $\sigma_{von} = 1502.3$  МПа.

При приложении к связке давления  $p = 10$  МПа, соответствующего усилию  $P = 0.4$  Н, получили: перемещение зерна  $U_y^3 = 0.3049$  мкм; напряжения в зерне (поликристалле)  $\sigma_{von} = 2406$  МПа; напряжения в связке  $\sigma_{von} = 812.54$  МПа.

При этом в 234 элементах зерна и в 127 элементах СТМ энергия деформации превысит критическое значение и объемы разрушенного зерна и поликристалла составят соответственно  $V_3 = 0.019$  мкм<sup>3</sup> и  $V_{СТМ} = 0.012$  мкм<sup>3</sup>.

Характер распределения приведенных напряжений в зерне для базовой модели при перемещении связки  $U_y^c = 5$  мкм приведены на рис. 5.5.

Соответствие между кинематическим и силовым воздействием модели имеет вид: из условия равенства напряжений в зерне (поликристалле):

$$P = 14.79 U_y^c; \quad (5.8)$$

из условия равенства напряжений в связке:

$$P = 14.79 U_y^c; \quad (5.9)$$

из условия одинакового перемещения зерна:

$$P = 14.79 U_y^c. \quad (5.10)$$

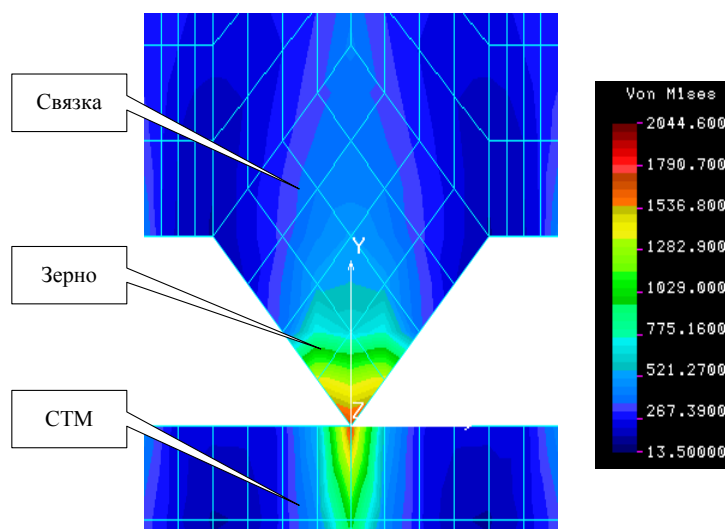


Рис. 5.5. Приведенные напряжения в системе при линейном контакте зерна с СТМ

Зависимости (5.8)–(5.10) тождественны, что подтверждает соответствие деформирования модели в принятых контрольных точках при силовом и кинематическом нагружении. В дальнейшем для контакта зерна с поликристаллом по ребру в соответствии с (5.8)–(5.10) принята зависимость:

$$P = 14.79 U_y^c. \quad (5.11)$$

Влияние свойств материала элементов модели по аналогии с моделью, рассматривавшейся в п. 5.3.1, с учетом соответствия, выраженного зависимостями (5.8)–(5.10), анализировались при кинематическом нагружении перемещением связки  $U_y^c = 5$  мкм. Анализ деформирования модели производился при упругих характеристиках фрагментов, соответствующих п. 5.3.1 относительно модели с базовыми характеристиками. Результаты определения НДС для модели с линейным контактом (по ребру) приведены в табл. 5. 2.

Таблица 5.2 – 3D НДС в характерных точках конечноэлементной модели при линейном контакте зерна (ребром)

	Базовый вариант	Связка		СТМ		Зерно
		$E = 100$ ГПа	$E = 130$ ГПа	$E = 800$ ГПа	$E = 1000$ ГПа	$E = 800$ ГПа
$U_y^{\text{зер}}$ , мкм	0.564	0.658	0.731	0.369	0.300	0.516
$\sigma_{\text{ПК}}$ , МПа	4449	5192	5770	4554	4591	4025
$\sigma_{\text{св}}$ , МПа	1502	1807	2059	1576	1603	1405

Анализ этих данных показывает, что, как и при контакте зерна с поликристаллом вершиной, наиболее эффективным с точки зрения увеличения приведенных напряжений в поликристалле является повышение модуля упругости связки:

$$\frac{\Delta U_y^3}{\Delta E_{\text{св}}} = 0.00288 \text{ мкм/ГПа},$$

что на порядок больше, чем при повышении модуля упругости зерна:

$$\frac{\Delta U_y^3}{\Delta E_3} = 0.00024 \text{ мкм/ГПа},$$

при слабом влиянии на это характеристик поликристалла:

$$\frac{\Delta U_y^3}{\Delta E_{\text{ПК}}} = 0.000528 \text{ мкм/ГПа}.$$

При анализе влияния характеристик элементов на напряжения в зоне контакта ребра зерна с поликристаллом установлено, что доминирующим элементом при этом также является связка:

$$\frac{\Delta \sigma_{\text{ПК}}}{\Delta E_{\text{св}}} = 0.02277$$

при существенно меньшем (на порядок) влиянии жесткости зерна:

$$\frac{\Delta \sigma_{\text{ПК}}}{\Delta E_3} = 0.00212,$$

и практической незначимости свойств поликристалла:

$$\frac{\Delta \sigma_{\text{ПК}}}{\Delta E_{\text{ПК}}} = 0.000284.$$

Причем, по сравнению с моделью, рассмотренной в п. 5.3.1, средний градиент напряжений на границе зерно – поликристалл в этом случае в три раза ниже, что свидетельствует о том, что управление НДС при контакте зерна с поликристаллом по ребру существенно ослаблено с точки зрения влияния связки.

### 5.3.3. 3D НДС зоны шлифования при контакте зерна по плоскости

3D модель взаимодействия зерна с поликристаллом при плоском контакте (по грани) представлена на рис. 5.6 а. При формировании для этой модели было сгенерировано 2448 элементов типа SOLID, 8561 узел (рис. 5.6 б). Условия закрепления, характеристики материала фрагментов и варианты нагружения аналогичны рассмотренным ранее в пп. 5.3.1, 5.3.2 моделям.

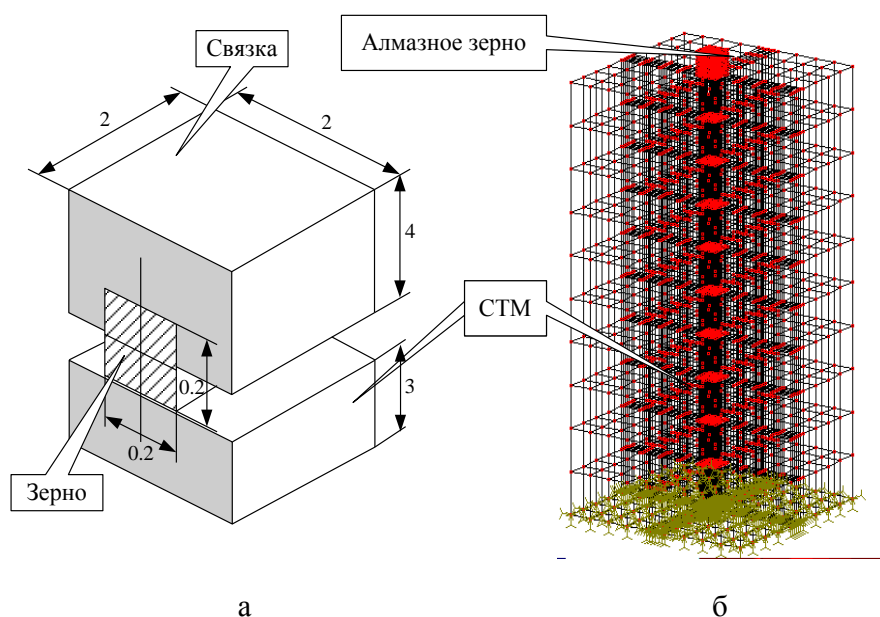


Рис. 5.6. Модель взаимодействия элементов системы «СТМ–зерно–связка» (а) и ее сгенерированная конечноэлементная сетка при плоском контакте зерна с СТМ (б)

В качестве реакции модели на нагружение рассматривались: перемещение узла (№ 88) контакта зерна с поликристаллом  $U_y$ ; напряжения (приведенные по Мизесу) в узле (№ 88) контакта зерна с поликристаллом  $\sigma_{von}$ ; напряжения (приведенные по Мизесу) в узле (№ 13) контакта связки с зерном  $\sigma_{von}$ .

При перемещении связки на величину  $U_y^c = 5$  мкм получили: перемещение (внедрение) зерна  $U_y^3 = 0.6553$  мкм; напряжения в зерне (поликристалле)  $\sigma_{von} = 753.12$  МПа; напряжения в связке  $\sigma_{von} = 946.7$  МПа.

При приложении к связке давления  $p = 10$  МПа, соответствующего усилию  $P = 0.4$  Н, упругое перемещение (внедрение) зерна в СТМ составляет  $U_y^3 = 0.2719$  мкм; напряжения в зерне (поликристалле)  $\sigma_{von} = 314$  МПа; напряжения в связке  $\sigma_{von} = 392.25$  МПа.

При этом ни в одном из элементов сетки СТМ и зерна энергия деформации не превысила критического значения и, следовательно, разрушения их не произошло. Это убедительно доказывает вывод о том, что образование площадок износа на алмазных зернах является основным ограничивающим фактором для производительного шлифования СТМ.

Характер распределения напряжений в системе для базовой модели при перемещении связки  $U_y^c = 5$  мкм представлен на рис. 5.7.

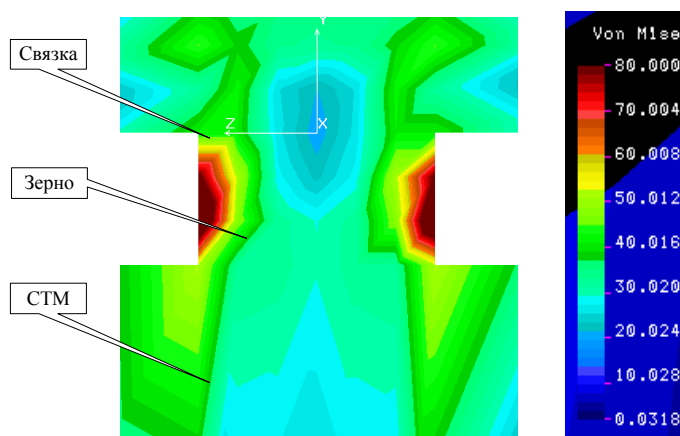


Рис. 5.7. Приведенные напряжения в системе «СТМ–зерно–связка»  
при плоском контакте зерна с СТМ

Соответствие между кинематическим и силовым взаимодействием описывается зависимостями:

из условия равенства напряжений в зерне (поликристалле)

$$P = 19.188 U_y^c; \quad (5.12)$$

из условия равенства напряжений в связке

$$P = 19.308 U_y^c; \quad (5.13)$$

из условия одинакового перемещения зерна

$$P = 19.28 U_y^c. \quad (5.14)$$

Зависимости (5.12)–(5.14) свидетельствуют о хорошем соответствии характера деформирования модели при кинематическом и силовом нагружении системы. Однако, в отличие от пп. 5.3.1, 5.3.2, оно не абсолютно. В дальнейшем при анализе контакта зерна с поликристаллом по плоскости с учетом (5.12)–(5.14) принята усредненная зависимость

$$P = 19.28 U_y^c. \quad (5.15)$$

Аналогично анализу, проведенному в пп. 5.3.1 и 5.3.2, деформирование базовой модели при контакте зерна с поликристаллом по плоскости рассматривалось при кинематическом нагружении перемещением связки  $U_y^c = 5$  мкм при изменении упругих свойств элементов базовой модели таких же, которые рассматривались ранее.

Результаты расчета приведены в табл. 5.3. Из анализа этих результатов следует, что на величину упругого заглубления зерна в поликристалл для этой модели:

$$\frac{\Delta U_y^3}{\Delta E_{св}} = 0.0059 \text{ мкм/ГПа}$$

также наиболее существенно влияют свойства связки при несоизмеримо малом по сравнению с этим влиянием соответственно характеристик зерна и поликристалла:

$$\frac{\Delta U_y^3}{\Delta E_3} = 0.000076 \text{ мкм/ГПа};$$

$$\frac{\Delta U_y^3}{\Delta E_{пк}} = 0.0006 \text{ мкм/ГПа}.$$

И в этом случае связка является определяющим элементом по вкладу в напряженное состояние в районе контакта зерна с поликристаллом

$\frac{\Delta \sigma_{пк}}{\Delta E_{св}} = 0.02278$  при  $\frac{\Delta \sigma_{пк}}{\Delta E_3} = 0.00212$  и  $\frac{\Delta \sigma_{пк}}{\Delta E_{пк}} = 0.000284$ . Причем градиенты

напряжений на границе зерна и поликристалла для этой модели практически совпадают с полученными в п. 5.3.2 для модели контакта по ребру, что подтверждает вывод о том, что управление НДС при контакте зерна с поликристаллом наиболее эффективно через влияние характеристик связки.

Таблица 5.3 – 3D НДС в характерных точках конечноэлементной модели при плоском контакте зерна (гранью)

	Базовый вариант	Связка		СТМ		Зерно
		$E = 100$ ГПа	$E = 130$ ГПа	$E = 800$ ГПа	$E = 1000$ ГПа	$E = 800$ ГПа
$U_y^{\text{зер}}$ , мкм	0.6653	0.840	1.010	0.443	0.3649	0.6501
$\sigma_{\text{пк}}$ , МПа	753.1	960.7	1150	915.0	987.1	789.2
$\sigma_{\text{св}}$ , МПа	946.7	1159	1354	989.2	1004	894

Влияние физико-механических свойств СТМ, зерна и связки на 3D НДС системы «СТМ–зерно–связка» приведено на рис. 5.8.

Из анализа табл. 5.1 – 5.3 и рис. 5.8 видно, что глубина упругого внедрения алмазных зерен, контактирующих вершиной, ребром или площадкой, различается незначительно, однако при этом величина приведенных напряжений в поликристалле может различаться более чем в 20 раз, а в связке более чем в 4 раза. Таким образом, зерна с площадками износа (контактирующие гранью) и кристаллиты расположенные «твердой» гранью в зоне контакта являются существенным ограничивающим фактором производительного процесса шлифования и образуют износостойкую пару трения «твердая грань кристаллита СТМ – твердая грань алмазного зерна».

Устранить такое anomальное для производительного шлифования состояние возможно тремя путями:

- удалить неблагоприятные зерна с поверхности РПК (например, удалением связки);
- целенаправленно разрушать площадку износа (например, воздействием алмазными инденторами с частотой ультразвуковых колебаний (см. гл. 7);
- сколоть зерно по плоскости, параллельной октаэдрической грани, по которой алмаз легче всего раскалывается, используя анизотропию свойств СТМ и зерен (гл.гл. 4 и 6).



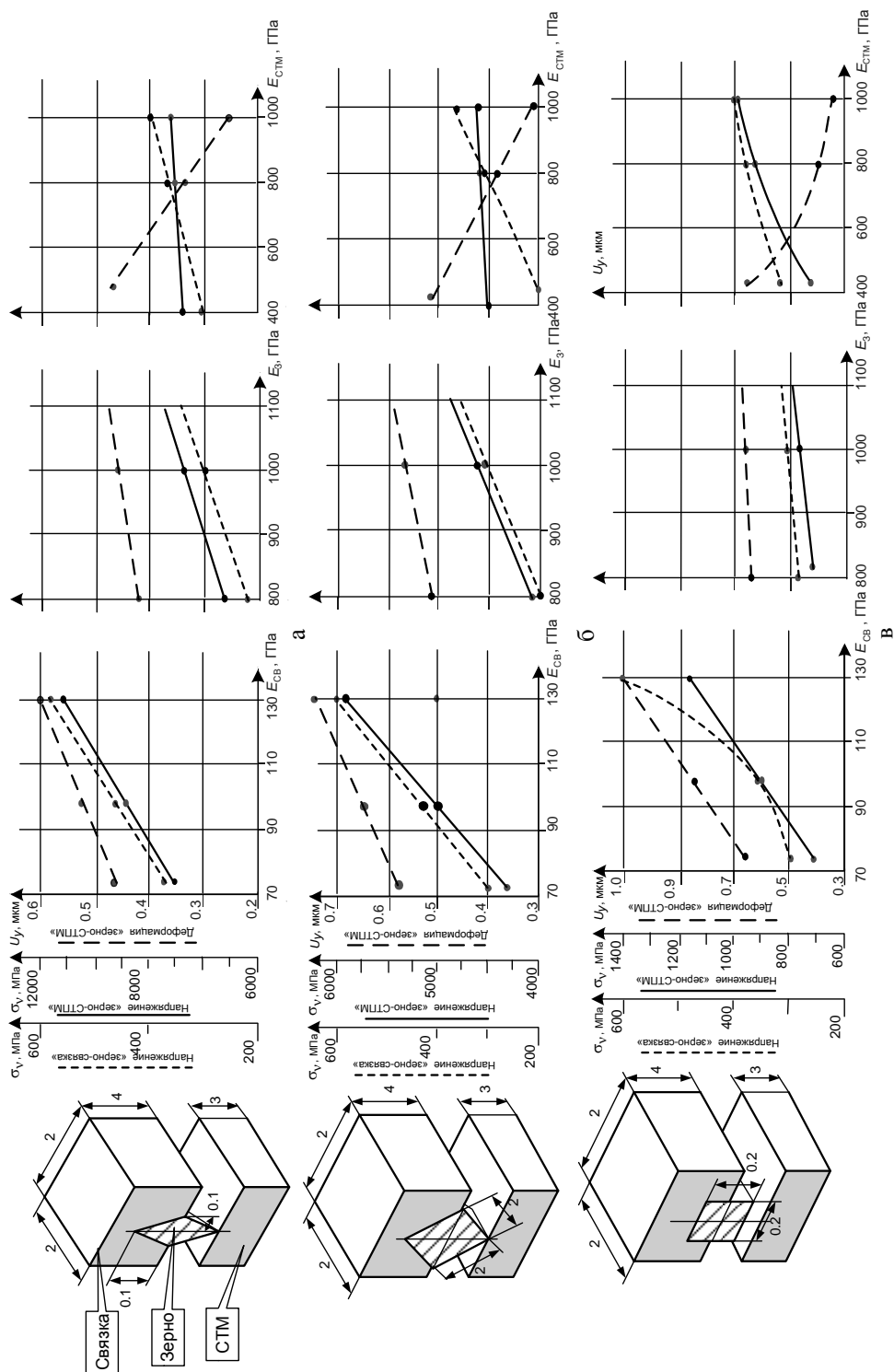


Рис. 5.8. Влияние физико-механических свойств элементов системы «СТМ–зерно–связка» на 3D НДС: контакт алмазного зерна с СТМ по вершине (а); ребру (б); по плоскости (в)

#### 5.4. Моделирование совместной работы различно ориентированных зерен при контакте с поликристаллом

Рассмотренные выше модели контакта зерна с поликристаллом по вершине, ребру и грани являются основой для моделирования совместной работы зерен различной ориентации.

Если общее число зерен модели, находящихся в контакте с поликристаллом  $N$ , а относительное количество зерен, ориентированных вершиной, ребром и гранью соответственно  $\bar{n}_v$ ,  $\bar{n}_p$  и  $\bar{n}_{gp}$ , усилие, действующее на связку при перемещении верха связки  $U_y^{cb}$  с учетом (5.7), (5.11) и (5.14)

$$P = N(P_v \bar{n}_v + P_p \bar{n}_p + P_{gp} \bar{n}_{gp}) = N(4.125 \bar{n}_v + 7.369 \bar{n}_p + 9.285 \bar{n}_{gp}) U_y^{cb}. \quad (5.16)$$

В действительности зерна могут занимать и промежуточные положения, которые при моделировании не рассматривались. Кроме того, в соотношении (5.14)  $\bar{n}_v$ ,  $\bar{n}_p$  и  $\bar{n}_{gp}$  связаны зависимостью

$$\bar{n}_v + \bar{n}_p + \bar{n}_{gp} = 1. \quad (5.17)$$

Из анализа результатов, приведенных в табл. 5.1 – 5.3 видно, что ответственными за разрушение зерна и СТМ являются напряжения в поликристалле (узле контакта зерна с поликристаллом), возникающие при контакте зерна с СТМ вершиной.

Для производительного шлифования необходимо выполнение условия разрушения СТМ в контакте с зерном, но при этом зерно не должно выпадать из связки. При упругой схеме шлифования подстановка (5.17) в уравнение (5.16) накладывает ограничения на напряжения в поликристалле и связке:

$$\sigma_{пк} = 8184.82 \cdot \frac{P}{N(4.125 \bar{n}_v + 7.369 \bar{n}_p + 9.285 \bar{n}_{gp})} \geq [\sigma]_{пк}; \quad (5.18)$$

$$\sigma_{св} = 339.93 \cdot \frac{P}{N(4.125 \bar{n}_v + 7.369 \bar{n}_p + 9.285 \bar{n}_{gp})} \leq [\sigma]_{св}. \quad (5.19)$$

Кроме того, в качестве ограничений должны быть рассмотрены допустимые сжимающие напряжения (суммарные) в поликристалле, исключающие его объемное разрушение (растрескивание):

$$\sigma_{\text{пк}} = \frac{P}{F} \leq [\bar{\sigma}]_{\text{пк}}, \quad (5.20)$$

где  $F$  – площадь поликристалла (для модели  $F = 1 \text{ мм}^2$ ) и предельное число зерен в контакте  $[N]$  (определяется концентрацией и рабочей высотой зерен).

При этом принято, что для вновь вскрытого круга:

$$\bar{n}_b = 1; \bar{n}_p = \bar{n}_{\text{гр}} = 0,$$

а для переходного периода:

$$\bar{n}_b = \bar{n}_p = \bar{n}_{\text{гр}} = 0.33.$$

При жесткой схеме шлифования уравнениями для ограничений являются зависимости (5.20) и (5.18) и уравнение, получаемое в результате подстановки (5.5) в (5.20):

$$\frac{N(4.125\bar{n}_b + 7.369\bar{n}_p + 9.285\bar{n}_{\text{гр}})U_y^{\text{св}}}{F} \leq [\bar{\sigma}]_{\text{пк}}. \quad (5.21)$$

На рис. 5.9 представлены зависимости силовых (а) и кинематических (б) воздействий ( $P$  и  $U_y^{\text{св}}$ ) от количества контактирующих зерен (концентрации), определяющие эффективные условия обработки СТМ. Таким образом, расчетным путем определена оптимальная зона бездефектной обработки СТМ, в которой выполняются условия эффективного съема припуска, удержания алмазных зерен в связке и исключения объемного разрушения (растрескивания) поверхности СТМ.

Эффективность обработки определяется количеством снятого материала поликристалла. Объем снимаемого материала поликристалла может быть определен как:

$$V_{\text{СТМ}} = [V_b^2 \bar{n}_b + V_p \bar{n}_p + V_{\text{гр}} \bar{n}_{\text{гр}}], \quad (5.22)$$

где  $V_b$ ,  $V_p$ ,  $V_{\text{гр}}$  – объемы элементов СТМ с закритическими приведенными напряжениями (энергиями деформации) в контакте с зерном соответственно вершиной, ребром и гранью.

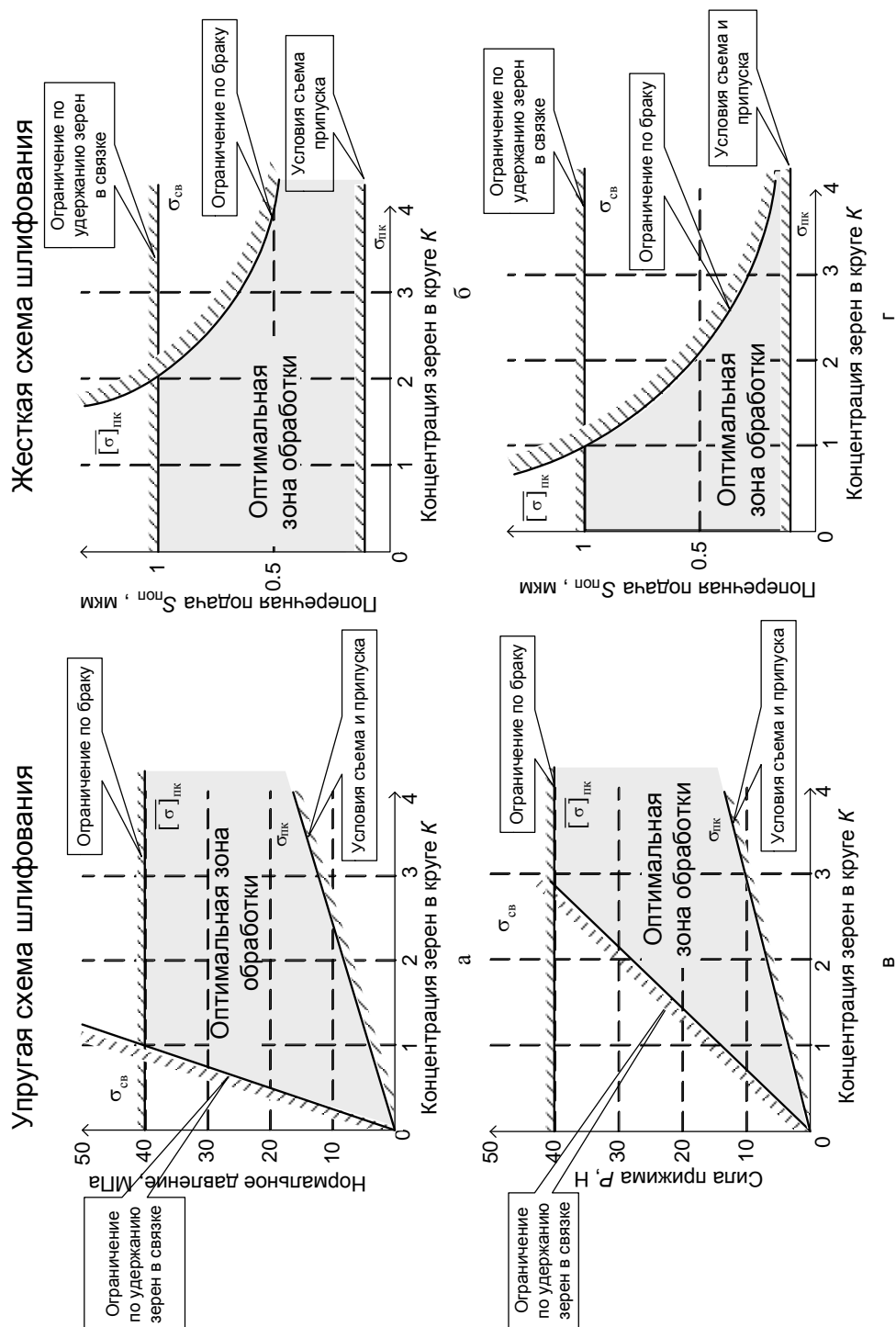


Рис. 5.9. Теоретическое определение оптимальной зоны бездефектной обработки СТМ:  
а, б – круг острый; в, г – круг изношенный

В табл. 5.4 приведены результаты расчетов суммарных объемов разрушенных зерен в зависимости от рабочей высоты их выступания из связки.

Таблица 5.4 – Зависимость суммарного объема разрушенных зерен на участке поверхности круга площадью  $100 \text{ мм}^2$  от их рабочей высоты

$\varepsilon_{\text{кр}}$	Зернистость	$h_{\text{max}}$ , мкм	Суммарный разрушенный объем зерен при заданной рабочей высоте, $\text{мм}^3$				
			$0.1h_{\text{max}}$	$0.2h_{\text{max}}$	$0.3h_{\text{max}}$	$0.4h_{\text{max}}$	$0.5h_{\text{max}}$
0.2	50/40	51.568	0.00001	0.0002	0.0017	0.0076	0.0236
	80/63	85.021	0.00002	0.0003	0.0021	0.0100	0.0328
	100/80	103.118	0.00003	0.0004	0.0032	0.0144	0.0453
	200/160	202.622	0.00006	0.0007	0.0064	0.0295	0.0936
	315/250	321.013	0.00008	0.0013	0.0111	0.0494	0.1529
0.3	50/40	47.183	0.000003	0.0001	0.0006	0.0036	0.0129
	80/63	75.299	0.000008	0.0002	0.0013	0.0062	0.0209
	100/80	88.447	0.000036	0.0005	0.0029	0.0121	0.0357
	200/160	172.216	0.000080	0.0010	0.0063	0.0265	0.0765
	315/250	275.135	0.000070	0.0012	0.0086	0.0387	0.1161
0.4	50/40	38.084	0.000008	0.0001	0.0009	0.0037	0.0111
	80/63	62.017	0.000018	0.0002	0.0012	0.0052	0.0160
	100/80	72.440	0.000035	0.0005	0.0030	0.0107	0.0284
	200/160	141.945	0.000075	0.0010	0.0061	0.0222	0.0589
	315/250	225.086	0.000089	0.0015	0.0099	0.0362	0.0955
0.5	50/40	32.918	0.000002	0.00004	0.0003	0.0016	0.0054
	80/63	53.070	0.000006	0.0001	0.0005	0.0024	0.0080
	100/80	65.819	0.000007	0.0001	0.0006	0.0030	0.0105
	200/160	127.348	0.000013	0.0002	0.0014	0.0070	0.0236
	315/250	202.800	0.000022	0.0002	0.0021	0.0107	0.0362
0.6	50/40	26.099	0.000003	0.000008	0.0002	0.0009	0.0031
	80/63	41.969	0.000005	0.00005	0.0003	0.0016	0.0050
	100/80	49.861	0.000010	0.00013	0.0008	0.0029	0.0080
	200/160	96.190	0.000025	0.0003	0.0019	0.0067	0.0180
	315/250	153.338	0.000033	0.0004	0.0025	0.0093	0.0256

Таким образом, теоретически определена область оптимального разрушения элементов системы «СТМ – зерно – связка», в которой зерно удерживается в связке и не разрушается, а СТМ разрушается в контакте, но не растрескивается из-за общей нагрузки всех зерен (исключается брак (см. рис. 5.9). Теоретически может быть определена область оптимальных условий алмазного шлифования различных марок СТМ, в том числе и вновь создаваемых. Дальнейшие экспериментальные исследования с целью сокращения их объема будут проводиться в этой области.

### 5.5. Теоретический анализ величины удельного расхода и износа алмазных зерен

Основной причиной высокой себестоимости процесса алмазного шлифования, наряду с высокой стоимостью алмазных кругов, является чрезвычайно низкий коэффициент использования потенциальных режущих свойств алмазных зерен. Известно, что лишь 5 – 15 % потенциала режущих свойств алмазных зерен эффективно используются, остальные 95 – 85 % уходят в шлам, а так как рекуперация шлама, как правило, не проводится, то оказывается, что большая часть объема зерен круга уходит в отходы, не совершив полезной работы [97].

Установлено, что при алмазном шлифовании СТМ интенсивность разрушения алмазных зерен может во много раз превышать интенсивность разрушения (съема) обрабатываемого СТМ (см. гл. 4). Так, например, при шлифовании АСПК зернами АС32 удельный расход равен 10 кар/кар. При этом для производственного процесса шлифования СТМ следует искусственно создавать условия, инициирующие микроразрушение алмазных зерен с целью исключения образования на них площадок износа, что успешно реализуется в процессах шлифования с управлением РПК.

Использование кругов на прочных металлических связках снижает удельный расход алмазов, но круги быстро «засаливаются» и требуют периодической правки, в процессе которой не эффективно используется практически столько же алмазных зерен, как и в процессе шлифования.

Разработанные способы шлифования с управлением режущим рельефом кругов [33] позволяют существенно повысить эффективность использования алмазных зерен при шлифовании труднообрабатываемых материалов. Однако, обработка таких уникальных материалов, как природные и синтетические алма-

**Примечание [V336]:** Стр: 181  
[a№3085] Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В.  
Износ алмазов и алмазных кругов. - М.:  
Машиностроение, 1967. - 112 с. {Book:  
Date 03/09/02 Time 21:38:20}

**Примечание [V337]:** Стр: 181  
[a№284] Грабченко А.И. Расширение  
технологических возможностей алмаз-  
ного шлифования. - Харьков: Вища шк.,  
1985. - 184 с. {Book: Date 03/09/02 Time  
21:38:50}

зы, сверхтвердые нитриды бора и композиционные материалы на их основе все таки требует значительных затрат алмазных зерен, а, следовательно, процесс, например, алмазной заточки резцов из СТМ оказывается дорогим.

Используя методику 3D моделирования НДС системы «СТМ – зерно – связка» и специально разработанную программу расчета объемов разрушенных и выпавших зерен и объемов разрушенных СТМ, удалось теоретически оценить важнейшие показатели процесса алмазного шлифования СТМ – удельный расход и удельный износ алмазных зерен. В табл. 5.5 приведены результаты расчета объемов разрушенных  $V_3$  и выпавших из связки  $V_{\text{вып}}$  зерен, разрушенного СТМ  $V_{\text{СТМ}}$  в зависимости от рабочей высоты зерен и критической величины их заделки. Эти данные позволяют оценивать величину удельного расхода и износа алмазных зерен.

Исследование 3D НДС системы «СТМ – зерно – связка» позволяет, определять объем разрушенного СТМ  $V_{\text{СТМ}}$  и зерна  $V_3$ , а также по величине  $h_{\text{кр}}$  определять объем выпавшей из связки части зерна  $V_{\text{вып}}$  и величину их заглубления в связку (табл. 5.5 – 5.7).

Таким образом, разработанная подсистема «Износ» позволяет оценить величины удельного износа (отношение объемов разрушенного зерна и СТМ)

$$q_{\text{и}} = \frac{V_3}{V_{\text{СТМ}}}$$

и удельного расхода

$$q_r = \frac{V_3 + V_{\text{вып}}}{V_{\text{СТМ}}}$$

в зависимости от физико-механических свойств СТМ, зерен, их анизотропии, модуля упругости связки, поперечной подачи, скорости шлифования, нормального давления. Результаты расчета величины удельного износа приведены в табл. 5.8.

Управляя параметрами контакта (величиной относительной фактической площади) и динамикой взаимодействия элементов системы «СТМ – зерно – связка» (скорость, подача, нормальное давление, введение в зону энергии ультразвуковых колебаний), можно перераспределять подводимую в зону шлифования энергию между элементами системы.

Методика 3D моделирования НДС системы «СТМ – зерно – связка» позволяет определять условия, при которых максимальная часть подводимой энергии в зону шлифования будет направлена на микроразрушение СТМ, миними-

зируя разрушение алмазных зерен, исключая их выпадение из связки и объемное разрушение СТМ (брак).

Таблица 5.5 – Влияние параметров взаимодействия системы на величину объемов разрушения ее элементов

Объем разрушенных материалов ( $\times 10^{10}$ ), мм <sup>3</sup>	Модуль упругости связки $E_{св}$ , ГПа			
	70	90	110	130
$V_3$	11	14	17	21
$V_{СТМ}$	3	6	8	11
$V_{вып}$	67	54	43	32
	Угол при вершине зерна $\phi$ , град			
	15	30	45	90
$V_3$	11	8	6	4
$V_{СТМ}$	3	1.1	0.6	0.2
$V_{вып}$	67	56	51	47
	Число острых зерен (в %)			
	80	60	30	10
$V_3$	18	12	7	5
$V_{СТМ}$	6	4	2	0.8
$V_{вып}$	67	54	49	43
	Модуль упругости СТМ $E_{СТМ}$ , ГПа			
	700	900	1100	1300
$V_3$	5	8	12	18
$V_{СТМ}$	2	1	0.6	0.3
$V_{вып}$	65	68	69	73
	Модуль упругости алмазных зерен $E_3$ , ГПа			
	1050(100)	1160(110)	1200(111)	1100(ср)
$V_3$	8	5	3	1
$V_{СТМ}$	2	3	2	11
$V_{вып}$	65	62	58	63
	Энергия разрушения, дж/м <sup>2</sup>			
	10.6(111)	13(110)	18(100)	14(ср)
$V_3$	7	5	3	6
$V_{СТМ}$	2	3	5	8
Уд.износ	12	15	17	16

Исследование влияния параметров топографии РПК на 3D НДС системы показали, что, если алмазное зерно даже незначительно выступает из связки ( $h_p \neq 0$ ), т. е. связка не контактирует с обрабатываемым материалом, в нем воз-



никают напряжения, достаточные для процесса самозатачивания (микроразрушения). Если зерно полностью заделано в связку ( $h_p = 0$ ) за счет объемного «обжата» связкой и отсутствия свободных границ оно не самозатачивается. В связи с этим производительный процесс шлифования СТМ следует осуществлять только при реализации первого типа взаимодействия в системе «РПК–СТМ» т.е. без контакта связки с обрабатываемым материалом.

Таблица 5.6 – Влияние физико-механических свойств связки и условий нагружения системы на величину критической заделки зерен в связку  $h_{кр}$ .

Критическая величина заделки	Модуль упругости связки $E$ , ГПа				
	70	100	130	198	
$h_{кр}$ , мкм	62	53	46	38	
	Контакт				
	вершиной	ребром	гранью		
$h_{кр}$ , мкм	62	50	34		
	Величина поперечной подачи, мкм				
	1	2	3	4	5
$h_{кр}$ , мкм	32	44	51	58	62
	Скорость круга $V$ , м/с				
	10	15	20	30	
$h_{кр}$ , мкм	32	47	63	82	

Таблица 5.7 Влияние условий нагружения системы поперечной подачей на величину заглабления зерен в связку

Величина заглабления	$S_{поп}$ , мкм при контакте зерна вершиной			
	1	2	3	4
$\Delta$ , мкм	0.07	0.11	0.81	1.3
	ребром			
	0.012	0.032	0.06	0.19
	гранью			
	0.006	0.011	0.03	0.08

Таблица 5.8 – Влияние условий нагружения на величину удельного износа

Удельный износ, кар/кар	Угол при вершине зерна $\phi$ , град			
	30	60	90	120
$q_{и}$	1.0	1.6	2.0	2.4
Удельный износ, кар/кар	Модуль упругости связки $E$ , ГПа			
	70	120	160	200
$q_{и}$	3.2	2.3	1.6	1.0

Рассмотренная ранее расчетная схема соответствует процессу плоского шлифования торцом алмазного круга (заточка лезвийного инструмента из СТМ) (рис. 5.10 б, г).

При круглом наружном шлифовании (рис. 5.10 а, в) процесс контактирования зерна с СТМ (и расчетная схема) и условие нагружения системы «СТМ – зерно – связка» будут существенно отличаться. Поэтому для такого процесса шлифования СТМ будет использована другая расчетная схема, примененная в теоретическом модуле экспертной системы. При круглом шлифовании напряжения в контакте «зерно – СТМ» значительно выше, чем при плоском, т. к. величина фактической площади контакта РПК – СТМ значительно меньше (рис. 5.10 д, е). В связи с этим предпочтительнее для производительного шлифования использовать круглое шлифование, а для прецизионного (доводочно-го) – плоское торцом круга.

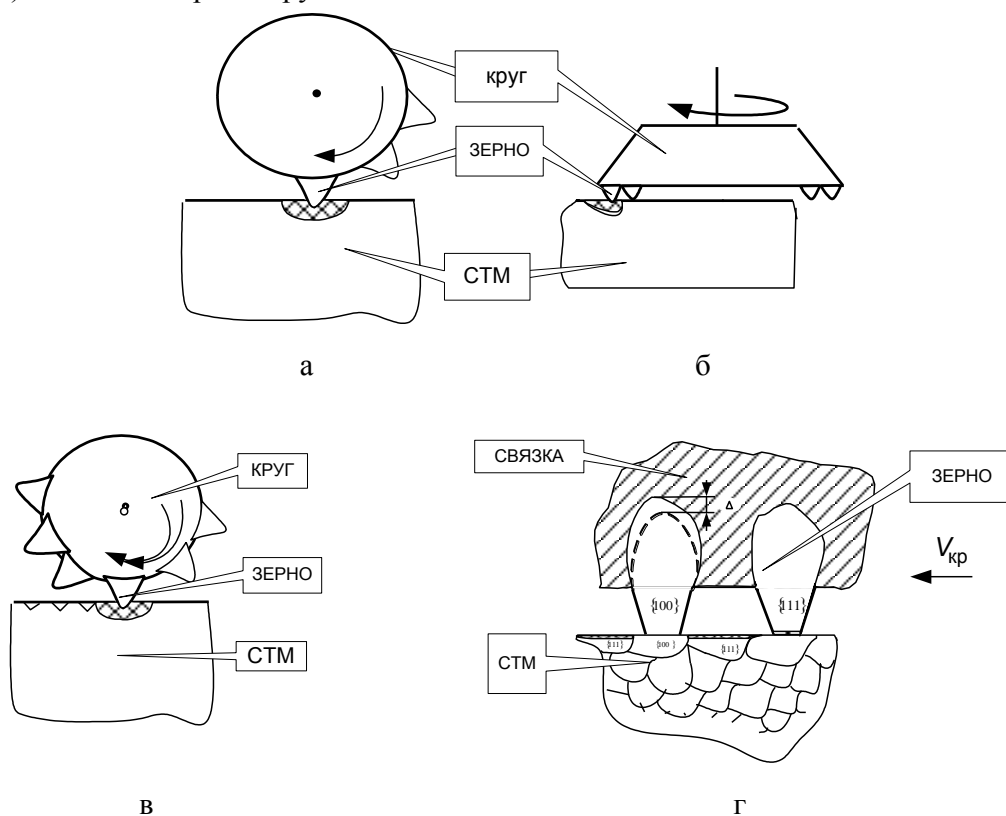


Рис. 5.10. Влияние схемы шлифования на 3D НДС элементов системы «СТМ–зерно»: а, б – схемы круглого и плоского шлифования; в – схема круглого шлифования; г – схема плоского шлифования торцом круга

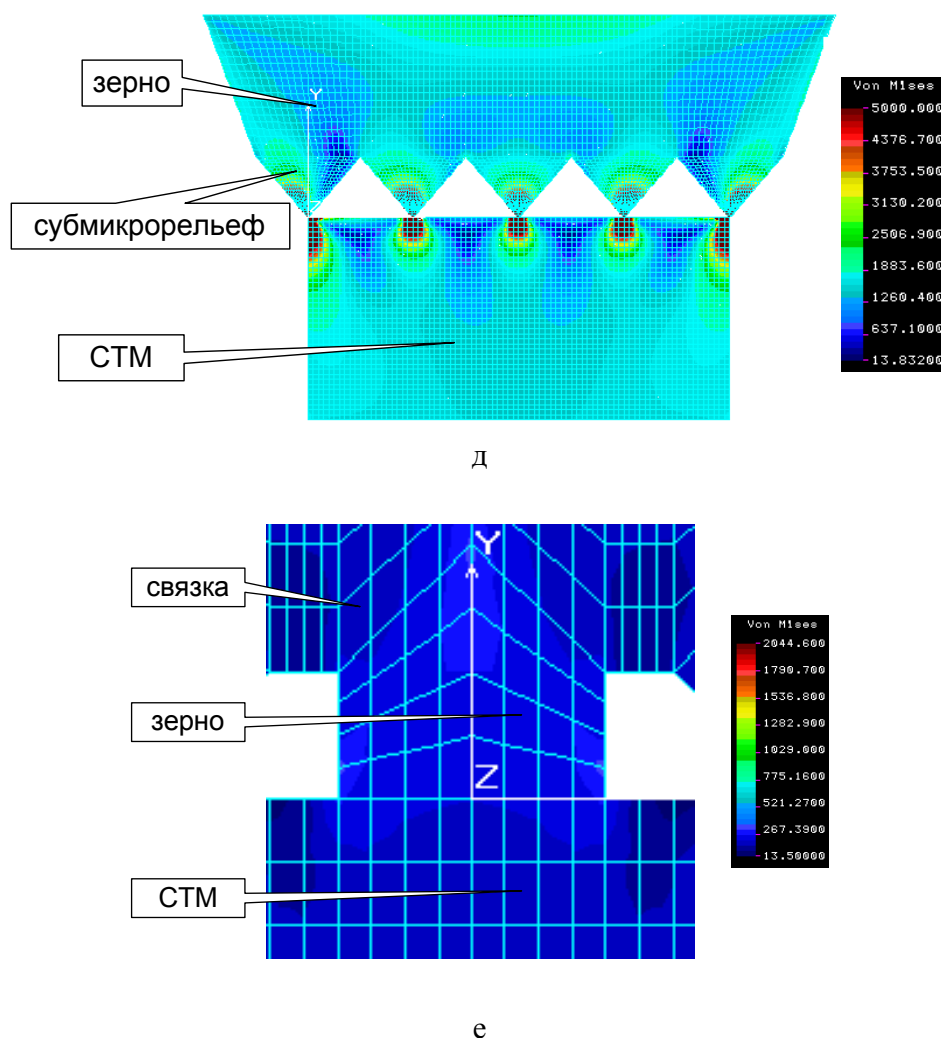


Рис. 5.10. Влияние схемы шлифования на 3D НДС элементов системы «СТМ-зерно» (продолжение):

д – НДС в зоне круглого шлифования; е – НДС в зоне плоского шлифования

Таким образом, теоретические расчеты методом МКЭ позволяют количественно оценить влияние физико-механических свойств алмазных зерен, СТМ и связки, параметров РПК на величину объемов разрушения СТМ и алмазных зерен, а также на объем выпавших из связки зерен. Эти результаты позволяют оценить величину удельного расхода и удельного износа алмазных зерен, т. е. определять коэффициент использования потенциальных режущих свойств алмазных зерен.

### 5.6. Модуль упругости связки и взаимное микроразрушение элементов системы «СТМ – зерно – связка»

Поскольку в условиях контактирования двух равнотвердых элементов системы «СТМ – зерно – связка» последняя является практически единственным элементом, физико-механическими свойствами которого можно варьировать в довольно широком диапазоне, следует более глубоко изучить ее роль в процессе алмазного шлифования СТМ.

В общепринятое представление о требованиях к связке, таких как максимальное алмазоудержание и способность к самозатачиванию, были внесены коррективы после разработки способов шлифования с управлением параметрами РПК [36]. Было снято требование к связке, связанное с обеспечением процесса самозатачивания (микроразрушения связки), однако наряду с требованием максимального алмазоудержания появилось требование к способности управляемого дозируемого удаления связки с поверхности РПК механическим или электро-физико-химическим методом, либо их комбинацией. На этом в настоящее время основные требования к связке практически ограничиваются.

Приведенные расчеты 3D НДС системы «СТМ – зерно–связка» выявили существенную роль модуля упругости связки во взаимном разрушении элементов системы, а не только в прочности удержания зерен.

Применительно к особенностям изучаемого процесса, рассмотрим:

- влияние физико-механических свойств (модуля упругости) связки на величину напряжений в контакте «зерно–СТМ» и, как следствие, на интенсивность разрушения СТМ и зерен, т. е. производительность шлифования и удельный износ, влияние величины заглубления зерен в связку на число работающих зерен и, как следствие, на величину фактической площади контакта «СТМ – РПК» и нагрузку на единичное зерно;
- влияние частоты собственных колебаний зерен, определяемой жесткостью связки, на процесс «отслеживания» анизотропии свойств кристаллитов СТМ;
- эффективность предложенного процесса принудительного формирования режущего субмикрорельефа на алмазных зернах (см. гл. 7).

При характерных для процесса алмазного шлифования СТМ «жестких» условиях нагружения самым слабым (модуль упругости связки в 10 раз меньше, чем у СТМ и зерен) звеном системы является связка.

**Примечание [V338]:** Стр: 187  
[a№3006] Грабченко А. И. Научные основы алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов: Диссертация в форме научного доклада докт. техн. наук: 05.03.01. - Харьков, 1995. - 59 с. {Book: Date 03/09/02 Time 21:39:23}

На первом этапе определяли влияние физико-механических свойств связки и условий взаимодействия элементов системы на величину критической заделки зерен в связку. Этот параметр необходим для определения числа фактически работающих зерен и фактической площади контакта в системе «СТМ – зерно – связка». В качестве критерия разрушения принято превышение величины приведенных напряжений предела текучести материала связки или величины ударной вязкости, которая для наиболее прочных связок М6-16 и М6-14 равна соответственно 66 и 29.5 – 61.4 кДж/м<sup>2</sup> [80]. Пределы текучести связок на основе алюминия, бронзы и железа соответственно равны 200, 270 и 470 МПа [200]. Как видно, наибольшей упругостью обладает связка на основе железа. Из серийно выпускаемых металлических связок наибольший модуль упругости у связки М6-16 (МО-3)  $E = 193.7$  ГПа.

Тенденции влияния модуля упругости связки на эффективность алмазного шлифования представлены на рис. 5.11.

Величину критической заделки алмазных зерен в связку  $h_{кр}$  определяли методом 3D моделирования НДС системы «СТМ – зерно – связка», приняв за предел прочности величину ее ударной вязкости. Результаты расчетов критической величины заделки при 3D моделировании НДС системы представлены в табл. 5.6.

По выбранному А. Н. Резниковым [153] критерию устойчивости зерен в связке, равному:  $E = h_{кр}/l_3$ , вычислили величину критической заделки и провели ее сравнение с результатами табл. 5.6. Расхождения в результатах, очевидно, связаны с тем, что в расчетах А. Н. Резникова решается плоская задача. Это не совсем корректно при соизмеримых размерах зерен и связки в модели.

На основании обработки результатов расчета в среде MathCAD получены аналитические зависимости влияния модуля упругости связки  $E_{св}$  (или ударной вязкости), рабочей высоты зерен  $h_p$ , нормального давления  $P_n$ , скорости шлифования  $V_{кр}$ , и поперечной подачи на критическую величину заделки зерен в связку  $h_{кр}$ :

$$h_{кр} = K_1 E_{св} h_p P_n; \quad (5.23)$$

$$h_{кр} = K_2 E_{св} h_p S_{поп}; \quad (5.24)$$

**Примечание [V339]:** Стр: 188  
[a№665] Кизиков Э.Д., Верник Е.Б., Кошевой Н.С. Алмазно-металлические композиции. - К.: Техніка, 1988. - 136 с. {Book: Date 03/09/02 Time 21:39:49}

**Примечание [V340]:** Стр: 188  
[a№119] Чачин В.Н., Дорофеев В.Д. Профилирование алмазных шлифовальных кругов. - Минск: Наука и техника, 1974. - 160 с. {Book: Date 03/09/02 Time 21:40:19}

**Примечание [V341]:** Стр: 188  
[a№593] Резников А.Н., Мовла-Заде В.З. Исследование устойчивости алмазных зерен в связке алмазно-абразивного инструмента // Синтет. алмазы, 1972. - 5. - С. 5-10. {Book: Date 03/09/02 Time 21:41:07}

$$h_{кр} = K_3 E_{св} h_p V_{кр}, \quad (5.25)$$

где  $K_{1,2,3}$  – коэффициенты, получаемые путем расчета 3D НДС системы «СТМ – зерно – связка» методом МКЭ;

$E_{св}$  – модуль упругости связки, ГПа;

$h_p$  – рабочая высота зерен, мкм;

$P_n$  – нормальное давление в контакте РПК–СТМ, МПа;

$S_{поп}$  – поперечная подача, мм/дв.ход;

$V_{кр}$  – скорость круга, м/с.

Результаты расчетов по этим зависимостям будут использованы при определении эффективности использования свойств алмазных зерен в теоретическом модуле экспертной системы процесса алмазного шлифования СТМ (см. гл. 8).

Поскольку модули упругости алмазных зерен и обрабатываемого материала практически одинаковы (без учета анизотропии свойств) и имеют предельные в природе значения, присущие алмазным структурам, а процесс съема припуска осуществляется в основном за счет чрезвычайно высоких контактных давлений, для производительного процесса необходимо создать такие контактные давления условиями шлифования.

В итоге установлено, что именно связка оказывает доминирующее влияние на параметры НДС системы и на величину контактных давлений в системе «зерно – СТМ» и, следовательно, во многом определяет интенсивность взаимного разрушения СТМ и зерен.

Расчеты показали, что степень влияния модулей упругости зерна, СТМ и связки на величину приведенных напряжений (или плотность энергии деформации) в СТМ оценивается как соответственно 0.02 – 0.036 – 0.164 или, оказывается, что модуль упругости связки влияет на величину напряжений в контакте «зерно–СТМ» в 8 раз больше, чем модуль упругости зерна и в 5 раз больше, чем модуль упругости СТМ. Например, при алмазном шлифовании СТМ кругом на связке М1-01 ( $E = 72$  ГПа) объем разрушенного СТМ при одноактном взаимодействии с алмазным зерном составляет  $4 \cdot 10^{-10}$  мм<sup>3</sup>, а при шлифовании кругом на связке М6-14 ( $E = 196$  ГПа) при тех же условиях этот объем составляет уже  $34 \cdot 10^{-10}$  мм<sup>3</sup>.

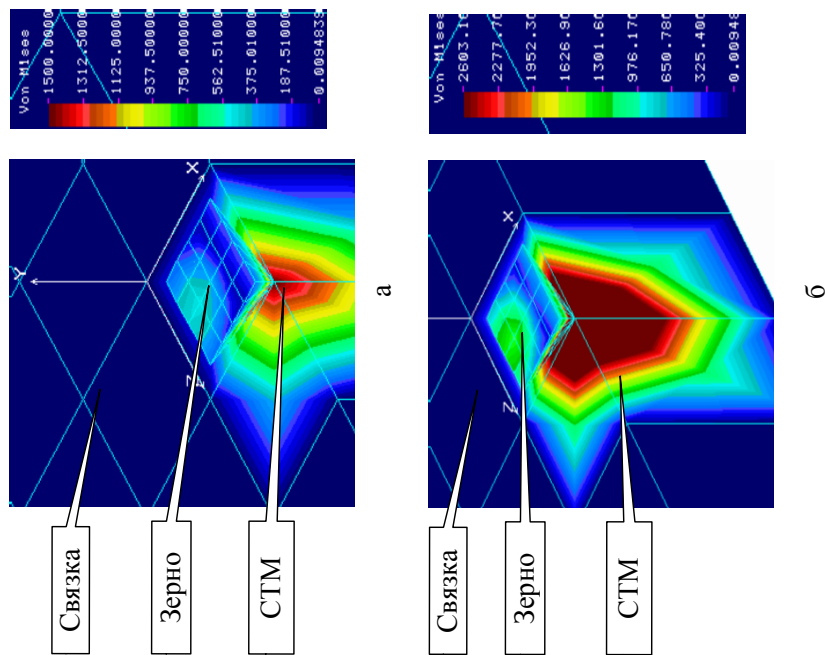


Рис. 5.11 – Влияние модуля упругости связки на эффективность алмазного шлифования СТМ:

а – приведенные напряжения в системе «зерно-СТМ» для связки М1-01 ( $E = 72$  ГПа);

б – приведенные напряжения в системе «зерно-СТМ» для связки М6-14 ( $E = 196$  ГПа);

Полученные результаты хорошо согласуются с установленной зависимостью влияния микротвердости связки на шероховатость обработанной поверхности керамики [3]:

$$R_a = 2.6 \cdot 10^{-10} d^4 (HV_c)^{0.67} (HV)^{0.54}, \quad (5.26)$$

где  $d$  – зернистость круга;

$HV$ ,  $HV_c$  – микротвердость обрабатываемого материала и связки круга.

Очевидно, использование более жестких связок (с повышенным модулем упругости) приводит к росту шероховатости поверхности главным образом за счет значительной силы соударения алмазных зерен с СТМ, и, как следствие, более интенсивного микроразрушения объемов СТМ.

Таким образом, существенным резервом повышения эффективности алмазного шлифования СТМ (и других твердых материалов) является повышение модуля упругости металлических связок. В связи с этим целесообразным представляется применение связок на основе железа, например, М6-14 (МЖ). При этом кроме установленных положительных эффектов повышения прочности алмазоудержания и эффективности контактного взаимодействия в системе «зерно – СТМ» такие связки существенно повышают эффективность доводки поверхности СТМ за счет интенсификации термоактивируемых процессов при контакте железной связки с алмазным СТМ (см. гл. 7).

В условиях 3D моделирования НДС системы «СТМ – зерно – связка» анализировалась и возможная величина заглубления зерна в связку. В условиях шлифования по жесткой схеме, когда в контакте РПК – СТМ с одной стороны контактируют чрезвычайно жесткие материалы «зерно – СТМ», очевидно, основная величина поперечной подачи должна быть компенсирована упругостью связки и величиной заглубления в нее алмазных зерен. С определенными допущениями процесс алмазного шлифования аналогичен процессу шаржирования [8] или процессу профилирования алмазных кругов методом пластического деформирования [200, 212], где в качестве притира выступает предельно жесткий материал СТМ, а шаржируемый материал – металлическая связка на основе алюминия, бронзы, железа или кобальта. При этом, как показал П.И. Ящерицын [212], даже алмазные зерна марки АСВ зернистостью 63/40 могут быть полностью заглублены (вдавлены) в связку без разрушения.

Наши расчеты, проведенные методом конечных элементов, показали, что чем меньше рабочая высота зерен, тем меньше вероятность разрушения алмаз-

**Примечание [V342]:** Стр: 191  
[a№3181] Алмазная обработка технической керамики / Д.Б. Ваксер, В.А. Иванов, Н.В. Никитков, В.Б. Рабинович. - Л.: Машиностроение, 1976. - 160 с. {Book: Date 03/09/02 Time 21:41:48}

**Примечание [V343]:** Стр: 191  
[a№3165] Способ шаржирования поверхностей: А.с. 982872 СССР, МКИ В 24 В 1/00. / Л.А. Сагарда, В.В. Маковецкий; Опубл. 1982, Бюл. № 47. {Book: Date 31/08/02 Time 15:29:19}

**Примечание [V344]:** Стр: 191  
[a№119] Чачин В.Н., Дорофеев В.Д. Профилирование алмазных шлифовальных кругов. - Минск: Наука и техника, 1974. - 160 с. {Book: Date 31/08/02 Time 15:30:51}

**Примечание [V345]:** Стр: 191  
[a№138] Ящерицын П.И., Дорофеев В.Д., Гринин Г.Н. Профилирование алмазно-абразивных инструментов пластическим деформированием. - Саратов: Изд-во Сарат. ун.-та, 1982. - 112 с. {Book: Date 31/08/02 Time 15:31:10}

**Примечание [V346]:** Стр: 191  
[a№138] Ящерицын П.И., Дорофеев В.Д., Гринин Г.Н. Профилирование алмазно-абразивных инструментов пластическим деформированием. - Саратов: Изд-во Сарат. ун.-та, 1982. - 112 с. {Book: Date 31/08/02 Time 15:31:33}



ных зерен. Это полностью совпадает с выводами П. И. Ящерицына по профилированию алмазных кругов. Этот вывод подтверждает наше положение о том, что процесс алмазного шлифования СТМ следует вести не с максимальной (как утверждалось ранее [36]), а с минимально возможной, исключающей контакт связки с СТМ высотой выступания зерен из связки  $h_p$ . Таким образом, при расчете числа работающих (контактирующих) зерен в процессе шлифования СТМ следует учитывать коэффициент деформирования (вдавливания) наиболее выступающих зерен в связку  $K_d$  и за счет этого вхождение в контакт вершин зерен, находящихся в слое  $\Delta$  от линии выступов. Расчетные величины упругого деформирования (вдавливания) зерен в связку, значения которой получены при 3D моделировании НДС системы, приведены в табл. 5.7.

В. И. Власов [26] получил оптимальные значения твердости связки для различных марок алмазных зерен и зависимость относительного внедрения зерна в связку от усилия прижима  $P$  (кГс):

$$P = 1.645 H_{св} d_3^2 \xi^{0.83}, \quad (5.27)$$

где  $H_{св}$  – микротвердость связки;

$d_3$  – размер зерна;

$\xi = \frac{a}{R_3}$ ,  $a$  – внедрение зерна в связку.

Получена зависимость между прочностью зерна  $\sigma_3$  и величиной его относительного внедрения в связку при разрушении  $\xi_p$ :

$$\sigma_3 = \frac{\alpha}{\pi} \sigma_{тс} \xi_p^\beta \exp(-\gamma \xi_p^\delta) \quad \text{при } \xi \leq 1. \quad (5.28)$$

Установлено, что чем прочнее алмазное зерно, тем более твердую связку следует применять. В нашем случае, когда внедрение алмазного зерна в обрабатываемый материал ничтожно мало и им можно пренебречь, модуль упругости связки будет определяться из условия динамического вдавливания зерна в связку без его разрушения, т. е. фактически динамической прочностью зерен, определяемой по предложенной нами методике (см. п. 2.3).

Таким образом, модуль упругости связки должен обеспечивать прочность удержания зерен в связке, нагрузку на зерно, достаточную для одноактного

**Примечание [V347]:** Стр: 192  
[a№3006] Грабченко А. И. Научные основы алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов: Диссертация в форме научного доклада докт. техн. наук: 05.03.01. - Харьков, 1995. - 59 с. {Book: Date 31/08/02 Time 15:32:26}

**Примечание [V348]:** Стр: 192  
[a№3166] Власов В.И. Оптимальная твердость связки алмазных шлифовальных кругов // Алмазы и сверхтвердые материалы. - 1976. Вып. № 2. - С. 15-20. {Book: Date 03/09/02 Time 21:42:59}

микроразрушения зерна у вершины с постепенным заглублением его в связку. Введение в зону шлифования или/и в зону управления энергии ультразвуковых колебаний (см. гл. 7) существенно повышает вероятность заглубления алмазных зерен в связку, что естественно продлевает их активную жизнь. Такой эффект использован А. А. Сагардой в способе шаржирования поверхности абразивными зернами [8].

Величина модуля упругости связки влияет также на частоту собственных колебаний алмазных зерен в связке, которая определена нами методом конечных элементов (см. гл. 7). Жесткость связки важна и при отслеживании анизотропии свойств кристаллитов СТМ – чем жестче связка, тем больше вероятность «успевания» отследить анизотропию, тем производительнее процесс. Дополнительные требования к жесткости связки для обеспечения или не обеспечения отслеживания анизотропии свойств кристаллитов для производительного или доводочного (прецизионного) шлифования рассмотрены в п. 4.7.

Влияние модуля упругости связки круга и инструмента – ударника на выходные показатели процесса шлифования СТМ приведены на рис. 5.12.

Таким образом, расчеты 3D НДС системы «СТМ – зерно – связка» показали, что модуль упругости металлической связки является наиболее значимым параметром, определяющим эффективность взаимного разрушения элементов системы «СТМ – зерно – связка» при алмазном шлифовании. Увеличение жесткости металлической связки в два раза может в 7 раз увеличить напряжение в контакте «зерно – СТМ», а, следовательно, существенно повысить производительность шлифования. Положительная роль увеличения модуля упругости связки в эффективности управляемого процесса шлифования СТМ представлена на рис. 5.11.

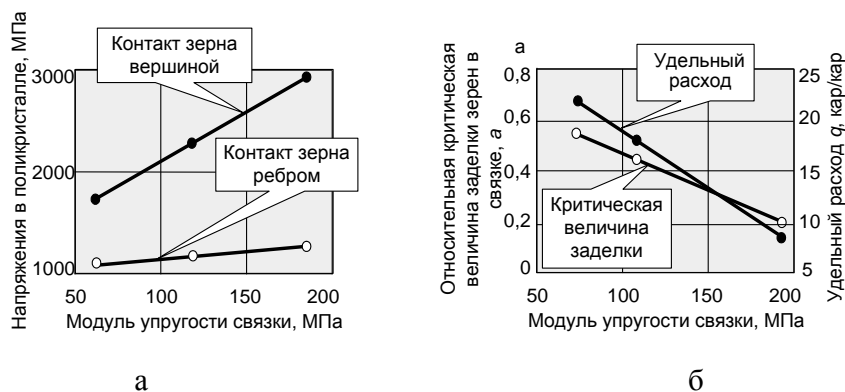
Увеличение модуля упругости (жесткости) связки обеспечивает следующие положительные эффекты при шлифовании:

- повышает прочность алмазоудержания;
- повышает эффективность взаимного микроразрушения в контакте «зерно – СТМ» за счет увеличения силы соударения;
- обеспечивает большую вероятность отслеживания алмазными зернами «мягких» и «твердых» граней кристаллитов СТМ за счет увеличения частоты собственных колебаний зерен в связке, что способствует повышению производительности шлифования.

**Примечание [V349]:** Стр: 193  
[a№3165] Способ шаржирования поверхностей: А.с. 982872 СССР, МКИ В 24 В 1/00. / Л.А. Сагарда, В.В. Маковецкий; Оpubл. 1982, Бюл. № 47. {Book: Date 31/08/02 Time 15:38:06}

### Зона шлифования

Влияние модуля упругости связки круга на напряжения в поликристалле, удельный расход и критическую величину заделки зерен в связке



### Зона управления

Влияние модуля упругости связки круга и ударника на напряжения в зерне круга

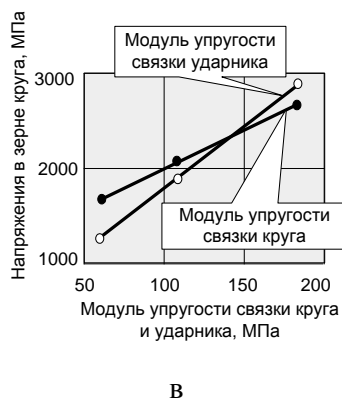


Рис. 5.12. Влияние модуля упругости связки круга и инструмента ударника на напряжения в СТМ (а), зерне (в), критическую величину заделки зерен в связку и удельный расход (б)

Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что оптимальным подбором соотношения жесткостей (модулей упругости) металлической связки круга и связки инструмента-ударника можно создать условия, при которых при соударении будут максимально микроразрушаться алмаз-

ные зерна круга, т.е. на площадках износа зерен будет формироваться режущий субмикрорельеф, а более прочные алмазные зерна (АС160Т) инструмент-ударника будут оставаться целыми.

Таким образом, сформулировано и доказано положение о существенной роли жесткости металлической связки в эффективности взаимного микроразрушения элементов системы «СТМ – зерно – связка» за счет увеличения силы соударения в контакте «зерно – СТМ», повышения прочности алмазоудержания и вероятности отслеживания анизотропии кристаллитов СТМ (повышение производительности шлифования и сокращения удельного расхода) и эффективности формирования на алмазных зернах режущего субмикрорельефа.

### 5.7. Усталостно-циклическое микроразрушение элементов системы «СТМ – зерно»

Если нагрузка в контакте «зерно – СТМ» оказывается недостаточной для одноактного микроразрушения ее элементов, в действие вступает циклический характер микроразрушения СТМ и алмазных зерен.

В этом случае шлифование СТМ рассматриваем как усталостно-циклическое микровыкрашивание в контакте «зерно – СТМ» и решается усталостно-циклическая контактная задача с использованием методики расчета, предложенной Н. В. Новиковым в работе [71].

При шлифовании таких хрупких материалов (СТМ) процесс резания может моделироваться как процесс трещинообразования, в котором напряженное состояние материала при раскалывании определяется особенностями возникновения и движения трещины разрушения [5, 18, 78]. Возможность усталостно-циклического разрушения СТМ впервые показана М. Ф. Семко [211] и подтверждена Н. В. Новиковым [71]. Монокристаллы сверхтвердых материалов и, в частности, синтетических алмазов можно отнести к материалам, находящимся в экстремально хрупком состоянии. Из-за особенностей структуры они не терпят при комнатной температуре пластических деформаций даже при напряжениях, близких к теоретической прочности. Однако, результаты исследования развития квазиравновесных трещин в монокристаллах природных алмазов при статическом индентировании, приведенных в работах [46, 48], а также при повторно-переменном индентировании поверхности алмазного зерна [218] показали траекторию распространения поверхностной усталостной тре-

**Примечание [V350]:** Стр: 195

[a№3033] Новиков Н.В., Примак Л.П., Майстренко А.Л., Ващенко А.Д. Исследование распространения усталостных трещин в монокристаллах синтетических алмазов // ДАН СССР. - 1981. Вып. 256. - С. 1122-1126. {Book: Date 03/09/02 Time 21:45:36}

**Примечание [V351]:** Стр: 195

[a№3183] Апанасенко В.И. Выбор режимов шлифования твердых и хрупких материалов, исходя из требуемой чистоты поверхности: Дис... канд. техн. наук: 05.02.08. - Орджоникидзе, 1972. - 212 с. {Book: Date 03/09/02 Time 21:47:18}

**Примечание [V352]:** Стр: 195

[a№3184] Булгаков В.Е., Золотов А.Б., Белый М.В. Полуитерационный метод решения пространственных краевых задач расчета сооружений // Строительная механика и расчет сооружений. - 1985. - № 6. - С. 38-40. {Book: Date 03/09/02 Time 21:46:06}

**Примечание [V353]:** Стр: 195

[a№3185] Караванов Ю.И. Выбор оптимальных условий резания полимерных материалов // Матер. Всесоюз. научно-техн. семина. "Обработка резанием новых конструкционных и неметаллических материалов". - М. - 1973. - С. 160-174. {Book: Date 03/09/02 Time 21:46:53}

**Примечание [V354]:** Стр: 195

[a№3046] Семко М.Ф., Красильников Е.В., Сизый Ю.А., Узунян М.Д. Электроно-микроскопическое исследование характера износа единичных алмазных зерен // ДАН СССР. - 1975. - 220. - № 6. - С. 1303-1305. {Book: Date 03/09/02 Time 21:48:26}

**Примечание [V355]:** Стр: 195

[a№3005] Девин Л.Н. Определение предела прочности при растяжении поликристаллических сверхтвердых материалов // Сверхтвердые материалы. - 1988. - № 2. - С. 24-28. {Book: Date 03/09/02 Time 21:49:21}

**Примечание [V356]:** Стр: 195

[a№3168] Девин Л.Н., Романенко В.В. К определению трещиностойкости композитов на основе твердого сплава // Сверхтвердые материалы. - 1982. - № 2. - С. 33-37. {Book: Date 03/09/02 Time 21:49:46}

**Примечание [V357]:** Стр: 195

[a№3178] Howes V.R. The critical stress for the production of pressure crack figures on diamond faces // Proc. Phys. Soc. London. - 1959. - Vol. 74. - № 475. - P. 48-52. {Book: Date 03/09/02 Time 21:50:13}

щины. Процесс удаления поверхностного слоя взаимодействующих зерна и поликристалла как процесс циклического усталостного накопления повреждений можно трактовать как непрерывный процесс образования, слияния и роста микротрещин, переход в макротрещину, ее старт и разрушение поверхности с образованием лунки или кратера разрушения. При этом считается, что усталостное разрушение как процесс роста и старта микротрещины, характерно как для поликристалла, так и для алмазного зерна. Результаты этих исследований положены нами в основу разработки подсистемы усталостно-циклического разрушения элементов системы «зерно – СТМ», теоретического модуля экспертной системы процесса алмазного шлифования сверхтвердых материалов с комбинированным управлением параметрами рабочей поверхности круга [189].

Как было показано, интенсивность съема припуска реализуется в течение достаточно короткого промежутка времени, после чего производительность постепенно падает практически до нуля. Это связано с изменением топографии режущей поверхности круга, изменения субмикрорельефа режущих алмазных зерен и геометрических параметров их вершин, а также аналогичных изменений в поверхностном слое поликристаллов. По истечении времени взаимное разрушение микрообъемов в процессе одноциклового взаимодействия прекращается и ему на смену приходит физически иной процесс разрушения – усталостно-циклический.

Резюмируя изложенное, будем рассматривать процесс контактного взаимодействия алмазного зерна с обрабатываемым сверхтвердым поликристаллом как процесс взаимного поверхностного разрушения, возникающего при многократном (циклическом) их взаимодействии. Разрушение поверхностного слоя хрупкого материала (съем припуска) представим в виде совокупности определенного количества единичных актов разрушения, которые приводят к удалению части материала поверхности. При этом можно говорить о последовательном отделении фрагментов материала поверхностного слоя за счет местных разрушений. Физически это явление является следствием зарождения, роста и взаимодействия (пересечения) трещин под воздействием индентора с материалом поверхности.

Принимая за основу физическую природу описанного механизма разрушения, рассмотрим контактное взаимодействие поверхности поликристалла, моделируемого в виде полупространства, и затупившейся режущей части алмазного зерна в виде сферического индентора радиуса  $R$ . Задача формулируется следующим образом: при заданных технологических параметрах, физико-

**Примечание [V358]:** Стр: 196  
[a№3244] Федорович В.А. Теоретическая экспертная система процесса алмазного шлифования сверхтвердых материалов // Сучасне машинобудування. 2000.- № 3-4.- С. 100-105. {Book: Date 03/09/02 Time 21:51:35}

механических характеристиках алмазного зерна, материала поликристалла и связки шлифовального круга в рамках модели алмазного зерна и связки определить количество циклов контактного взаимодействия, приводящее к разрушению поверхности поликристалла (полупространства).

Для решения поставленной задачи примем следующие допущения:

- физически саморазрушение как процесс образования кратера и выноса фрагментов материала будем трактовать состоявшимся при констатации факта появления кольцевых, радиальных или иных трещин на поверхности;
- на данном этапе решения предполагается, что физико-механические свойства взаимодействующих объектов не зависят от скорости приложения нагрузки;
- влияние температурного фактора учитывать не будем.

*Формулировка задачи с точки зрения механики циклического разрушения.*

Базируясь на основных положениях линейной механики разрушения, будем считать, что геометрия трещины определяется только одним параметром – длиной, а текущая интенсивность роста трещины характеризуется приращением длины за цикл или скоростью роста  $dl / dN$ . Для оценки начала местного контактного разрушения по числу циклов контакта СТМ в виде полупространства и алмазного зерна шлифовального круга на стадии роста трещины используется соотношение Пэриса [198]:

$$\frac{dl}{dN} = B \left[ (\Delta K_I)^m - (\Delta K_{th})^m \right], \quad (5.29)$$

где  $B, m$  – экспериментальные постоянные;

$\Delta K_I = K_{I \max} - K_{I \min}$  – размах КИН за один цикл нагружения;

$K_{I \max}, K_{I \min}$  – максимальное и минимальное значения КИН;

$N$  – число циклов нагружения;

$\Delta K_{th}$  – пороговое значение КИН.

Последняя величина интерпретируется как минимальный размах КИН, требуемый для прорастания трещины. Смысл порогового значения  $\Delta K_{th}$  заключается в том, что не каждая начальная трещина будет расти и, следовательно, для существования ненулевой скорости  $dl / dN$  должно быть сформулировано некоторое критическое условие [198, 204]. Естественно, что верхней границей для  $K_{I \max}$  должно быть критическое значение  $K_{IC}$ . Значения величин  $B, m, \Delta K_{th}$

**Примечание [V359]:** Стр: 197  
[a№3051] Хеллан К. Введение в механику разрушения. - М.: Мир, 1988. - 364 с.  
{Book: Date 03/09/02 Time 21:52:15}

**Примечание [V360]:** Стр: 197  
[a№3051] Хеллан К. Введение в механику разрушения. - М.: Мир, 1988. - 364 с.  
{Book: Date 03/09/02 Time 21:52:15}

**Примечание [V361]:** Стр: 197  
[a№3193] Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. - М.: Наука, 1974. - 640 с.  
{Book: Date 03/09/02 Time 21:54:09}

определяются экспериментально для каждого материала по методике, изложенной в п. 2.9.

Интегрирование уравнения (5.29) приводит к соотношению:

$$N - N_0 = \int_{l_0}^{l_c} \frac{dl}{B \left[ (\Delta K_1)^m - (\Delta K_{th})^m \right]}, \quad (5.30)$$

где  $l_0$  – начальное значение трещины, достаточное для усталостного роста;

$l_c$  – длина трещины, соответствующая критическому значению коэффициента интенсивности напряжений  $K_{IC}$ ;

$N_0$  – количество циклов нагружения до возникновения трещины длиной  $l_0$ .

Разрушение происходит в тот момент, когда длина трещины такова, что выполняется соотношение  $K_{1 \max} = K_{IC}$ . Критическая длина трещины  $l_c$  определяет искомое число циклов до разрушения  $N_c = N(l_c)$ .

Применительно к условиям контактного взаимодействия поверхности СТМ, содержащей некоторый дефект в виде микротрещины, с алмазным зерном шлифовального круга можно положить, что  $K_{1 \min} = 0$  (нет контакта) и  $\Delta K_1 = K_{1 \max}$ . Значение  $\Delta K_{th}$  для большинства материалов практически неизвестно, поэтому будем полагать заранее наличие микротрещины минимальной величины –  $l_0$  и  $\Delta K_{th} = 0$ ,  $N_0 = 0$ . С учетом последнего выражение (5.29) примет вид:

$$N = \int_{l_0}^{l_c} \frac{dl}{BK_{\max}^m}. \quad (5.31)$$

Для определения значения  $K_{\max}$  будем полагать, что рост трещины определяется максимальным значением КИН растягивающих напряжений –  $K_m$ . Трещина в пределах однократного нагружения развивается под углом  $\alpha$  к своему первоначальному направлению вдоль площадки, на которой возникают максимальные растягивающие напряжения, и согласно [137] могут быть представлены в виде:

$$K_m = \cos^2 \frac{\alpha}{2} \left( K_1 \cos \frac{\alpha}{2} - 3K_{11} \sin \frac{\alpha}{2} \right); \quad (5.32)$$

**Примечание [V362]:** Стр: 198  
[a№3050] Панасюк В.В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. - К.: Наук. думка, 1968. - 248 с. {Book: Date 03/09/02 Time 21:54:48}



$$\alpha = 2 \operatorname{arctg} \frac{1 - \sqrt{1 + 8k^2}}{4k}, \quad (5.33)$$

где  $K_1, K_{11}$  – коэффициенты интенсивности напряжений первого и второго рода;

$$k = K_{11} / K_1.$$

С использованием решения Н. В. Новикова [71] для расчета развития трещины в алмазном зерне, напряженное состояние у вершины трещины в рассматриваемом клине определяется соотношением типов КИН – нормального раскрытия  $K_1$  и сдвига  $K_{11}$ :

$$K_1 = \frac{2P\sqrt{\pi l}}{Ld} \left( \frac{\sin \alpha}{2\alpha - \sin 2\alpha} - \frac{\cos \alpha}{2\alpha + \sin 2\alpha} \right) \sin^2 \beta; \quad (5.34)$$

$$K_{11} = \frac{2P\sqrt{\pi l}}{Ld} \left( \frac{\sin \alpha}{2\alpha - \sin 2\alpha} - \frac{\cos \alpha}{2\alpha + \sin 2\alpha} \right) \sin \beta \cos \beta, \quad (5.35)$$

где  $P = \sqrt{P_v^2 + P_z^2}$ .

Как следует из приведенных выражений (5.34) и (5.35), для вычисления  $K_1$  и  $K_{11}$ , кроме значения  $P$ , необходимо текущее значение  $l$ .

На основании тщательного обмера фрагментов системы бороздок (террас) на образцах зерен было установлено систематическое увеличение расстояния между бороздками по направлению, совпадающему с направлением результирующей силы  $P$ . Данные о расстоянии между бороздками и другие линейные размеры зерна, полученные Н. В. Новиковым со стереопар, снятых при увеличении от 3000 до 8000, позволили определить текущую длину трещины и произвести расчет скорости её распространения ( $dl / dN$  мм/цикл) по числу циклов нагружения  $N$ .

При вычислении КИН  $K_1 = \Delta K$  в выражения (5.34) и (5.35) вводились следующие значения, соответствующие линейным размерам зерна и текущим значениям длины трещины:  $P = 3.86$  Н,  $l = 0.04$  мм,  $d = 0.18$  мм,  $L = 0.09$  мм,  $\beta = 35.7^\circ$ ,  $2\alpha = 70^\circ$ .

На основании приведенных данных [71] проведен расчет усталостного разрушения, из которого следует, что скорость распространения трещины  $dl / dN$  (для двух характерных образцов разрушенных зерен алмаза АСК и АСС)

**Примечание [V363]:** Стр: 199  
[a№3033] Новиков Н.В., Примак Л.П., Майстренко А.Л., Ващенко А.Д. Исследование распространения усталостных трещин в монокристаллах синтетических алмазов // ДАН СССР. - 1981. Вып. 256. - С. 1122-1126. {Book: Date 03/09/02 Time 21:55:15}



изменялась в диапазоне  $2.5 \cdot 10^{-4}$  до  $5 \cdot 10^{-3}$  мм/цикл, после чего наступала стадия квазистатического долома. Определение скорости на более ранней стадии развития разрушения не представлялось возможным из-за малого разрешения получаемого изображения поверхности излома при больших увеличениях.

Согласно критерию разрушения, выведенному Г. П. Черепановым [204], предельное состояние тела с трещиной при смешанном виде разрушения наступает, когда выполняется условие

$$f(K_1, K_{11}) = K_{1c} - K_1 f_0(\eta) = 0, \quad (5.36)$$

где  $K_{1c}$  – критической КИН при статическом нагружении;

$\eta = K_{11} / K_1$  (в рассматриваемом случае  $\eta = 1.39$ );

$$f_0(\eta) = 4\sqrt{2}\eta^3 \frac{1 + 3\sqrt{1 + 8\eta^2}}{(12\eta^3 + 1 - \sqrt{1 + 8\eta^2})^{3/2}} = 2.21. \quad (5.37)$$

По аналогии с критерием (5.36) можно записать критерий распространения усталостной трещины при смешанном виде разрушения:

$$K_{1fc} - K_1 f_0(\eta) \geq 0, \quad (5.38)$$

то есть

$$K_1 \leq \frac{K_{1fc}}{f_0} = \frac{K_{1fc}}{2.21}, \quad (5.39)$$

где  $K_{1fc}$  – критический КИН при циклическом нагружении ( $K_{1fc} \leq K_{1c}$ )

Для дальнейших расчетов используем результаты расчетов 3D модели НДС системы «СТМ – зерно – связка», проведенные в предыдущем разделе, т. е. используем реальные значения напряжения в контакте «зерно – СТМ».

При проведении расчетов принимались следующие физические характеристики материалов: модуль упругости поликристалла (полупространства) и алмазного зерна принимался одинаковым и равным –  $1.2 \cdot 10^6$  МПа; коэффициент Пуассона – 0.1; радиус закругления сферы – равнялся фокальному радиусу эллипсоида вращения, моделирующего алмазное зерно; критическое значение

**Примечание [V364]:** Стр: 200  
[a№3193] Черепанов Г.П. Механика  
хрупкого разрушения. - М.: Наука, 1974.  
- 640 с. {Book: Date 03/09/02 Time  
21:55:45}

коэффициента интенсивности напряжений  $K_c$  изменялось от 3.5 до  $10.3 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  [121].

Для реализации поставленной задачи был разработан алгоритм и создано программное обеспечение в рамках пакета Delphi 3. Организация вычислений опирается на использование 4-х баз данных, включенных в подсистему: геометрических и физических свойств синтетических алмазов различных марок и зернистостей (GRAIN.dbf); механических и термических свойств СТМ (ALMAZ.dbf); алмазных шлифовальных кругов (KRUG.dbf); различных видов связок (металлической, керамической, органической) (SVIAZKA.dbf).

Многообразие возможной исходной информации требует наличия возможности большого количества комбинаций ее задания в программе. Основным же параметром решения задачи, т. е. ее конечной целью является определение критического значения длины трещины по достижению числа циклов разрушения. Этот параметр трактуется как глубина съема обрабатываемого материала и также несет ответственность за качество обработанной поверхности (шероховатость). Найденное число циклов нагружения определяет необходимое число контактов алмазного зерна с обрабатываемым материалом до разрушения при заданных технологических параметрах процесса, величине действующей на зерно нагрузки и начальном значении микротрещины. В процессе решения поставленной задачи используются такие величины, как нормальное давление; количество участвующих в работе зерен данной марки, концентрации и зернистости; усредненное значение силы, действующей в контакте алмазного зерна и СТМ, и т. п.

Разработанная на базе приведенных расчетов подсистема теоретического модуля экспертной системы позволяет без проведения дорогостоящих и трудоемких экспериментов количественно оценить производительность шлифования СТМ и шероховатость обработанной поверхности в случае реализации усталостно-циклического механизма разрушения алмазных зерен и СТМ.

Приняв глубину снимаемого (разрушенного) слоя СТМ равным длине критической трещины  $L_{кр}$ , с учетом рассчитанной величины фактической площади контакта в системе «СТМ – зерно», числа циклов нагружения до разру-

**Примечание [V365]:** Стр: 201  
[a№3057] Новиков Н.В., Майстренко  
А.Л., Кулаковский В.Н. Сопротивление  
разрушению сверхтвердых композици-  
онных материалов. - Киев: Наук. думка,  
1993. - 220 с. {Book: Date 03/09/02 Time  
21:56:23}

шения кристаллита и скорости круга, можно приближенно оценить величину производительности при условии усталостно-циклического разрушения  $Q$ :

$$Q = \frac{4Kd_{\text{кр}}S_{\text{ф}}l_{\text{кр}}n_{\text{кр}}}{d_{\text{СТМ}}n_{\text{ц}}}; \quad (5.40)$$

$$Q = \frac{\pi Kd_{\text{кр}}d_{\text{СТМ}}t_{\text{ps}}l_{\text{кр}}n_{\text{кр}}}{100n_{\text{ц}}}, \quad (5.41)$$

где  $d_{\text{кр}}$  – диаметр круга, мм;

$S_{\text{ф}}$  – фактическая площадь контакта, мм<sup>2</sup>;

$N_{\text{кр}}$  – частота вращения шлифовального круга, об/мин;

$D_{\text{СТМ}}$  – диаметр СТМ, мм;

$t_{\text{ps}}$  – относительная опорная площадь профиля РПК, %;

$n_{\text{ц}}$  – число циклов нагружения до разрушения СТМ;

$l_{\text{кр}}$  – длина трещины разрушения, мкм;

$K$  – коэффициент корректировки по данным эксперимента.

Для обеспечения уточнения результатов расчета введен корректирующий коэффициент  $K$ , равный отношению теоретических и экспериментальных результатов. Интерфейс программы теоретического модуля подсистемы экспертной системы процесса шлифования СТМ представлен на рис. 5.13.

Разработанная подсистема теоретического модуля экспертной системы позволяет количественно оценить производительность шлифования различных СТМ алмазными кругами, а также шероховатость обработанной поверхности. Естественно, что в силу принятых допущений и ограничений они не могут полностью совпадать с экспериментальными, однако теоретический модуль экспертной системы позволяет существенно ограничить область, в которой находятся оптимальные условия шлифования, и тем самым сократить объем трудоемких и дорогостоящих экспериментальных исследований.

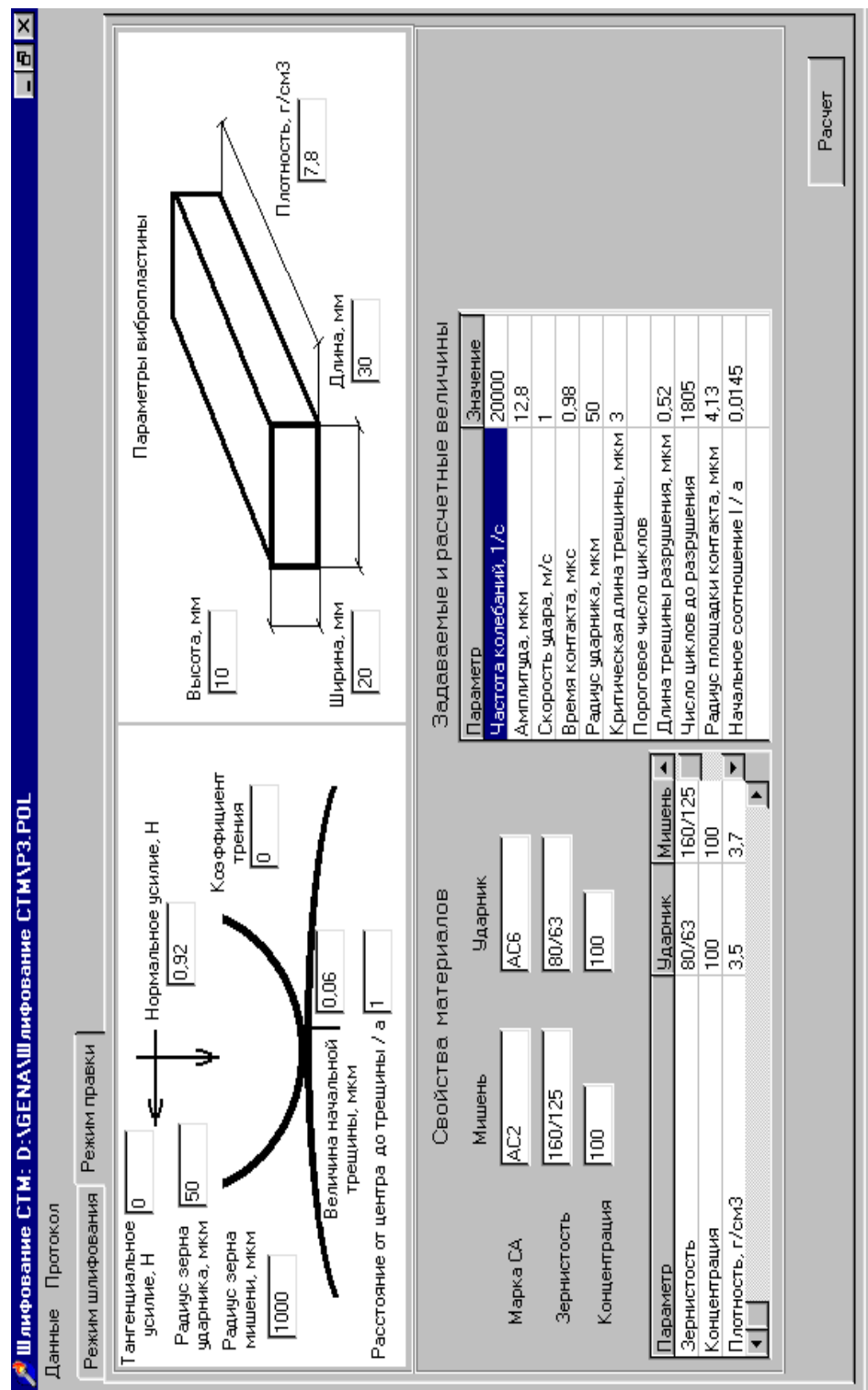


Рис. 5.13. Интерфейс подсистемы усталостно-циклического разрушения СТМ и зерен (экспертная система

## Выводы

Разработана комплексная методология 3D моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) зоны шлифования, включающая экспериментальное изучение 3D топографии СТМ и РПК лазерным сканированием и теоретическое описание 3D топографии РПК. Исследована 3D модель напряженно-деформированного состояния системы «СТМ – зерно – связка», позволяющая анализировать поведение системы как единого целого в зависимости от режимов шлифования – скорости, поперечной подачи, нормального давления и характеристики кругов (зернистость, концентрация, марка зерен и связки), уровня приспособляемости системы (износа круга).

На основе 3D моделирования напряженно-деформированного состояния системы «обрабатываемый сверхтвердый материал – зерно – связка» предложена научно-обоснованная системная классификация механизмов разрушения ее элементов. Систематика включает в себя типы взаимодействия элементов и виды их разрушения. Деление на типы взаимодействия определяется наличием или отсутствием контактирования связки алмазного инструмента с обрабатываемым материалом. При рассмотрении разрушения элементов системы выделено 20 основных видов, определяемых типом взаимодействия. Анализ механизмов разрушения позволил выявить и обосновать положение о необходимости и возможности управления приспособляемостью в процессе шлифования.

На базе 3D моделирования напряженно-деформированного состояния системы установлено, что для повышения точности теоретических расчетов процессов разрушения элементов системы «обрабатываемый сверхтвердый материал – зерно», следует использовать не усредненные физико-механические характеристики, а наиболее «неблагоприятные» их значения, обусловленные анизотропией. Например, меньшую микротвердость и модуль упругости, энергию разрушения, трещиностойкость, высокую износостойкость и т. д.

Расчет 3D напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «СТМ – зерно – связка» позволяет определять величину упругого деформирования (вдавливания) зерен в связку  $\Delta$  и критическую величину их заделки в зависимости от ее физико-механических свойств. Величину  $\Delta$  следует учитывать при расчете удельной фактической площади контакта «СТМ – зерно». Анализ влияния схемы шлифования на 3D НДС системы «зерно – СТМ» показывает, что предварительную высокопроизводительную обработку целесообразно проводить шлифованием периферией круга, а прецизионную (доводочную) – плоским торцевым.

Шероховатость обработанной поверхности СТМ зависит от зернистости, концентрации и нормального давления, но не за счет величины параметров среза, а через величину пятен контакта, удельных контактных давлений и критической длины трещины разрушения. Определяющее влияние на интенсивность взаимного разрушения элементов системы «СТМ – зерно» оказывает состояние субмикроструктуры (микропоры, микротрещины, включения) исходного состояния материала заготовки.

В отличие от шлифования других труднообрабатываемых материалов, при обработке СТМ прочность обрабатываемого и инструментального материалов, наряду с твердостью, играет определяющую роль в характере и интенсивности процессов микроразрушения. Так, производительность шлифования СТМ с увеличением коэффициента трещиностойкости  $K_{IC}$  от 4 до 10 МПа·м<sup>1/2</sup> уменьшается в 5 раз.

В условиях, когда контактируют равнотвердые материалы (СТМ и алмазные зерна) и величина упругого внедрения зерен в СТМ на порядок меньше их упругого заглубления в связку, даже незначительное увеличение модуля упругости связки обеспечивает существенное увеличение уровня напряжений в контакте «зерно – СТМ» и, как следствие, интенсивность его разрушения. Установлена существенная роль модуля упругости металлической связки в повышении эффективности взаимного микроразрушения элементов системы «СТМ – зерно – связка» за счет: увеличения силы соударения в контакте «зерно – СТМ» (в зоне шлифования) и «зерно круга – зерно ударника» (в зоне управления); повышения прочности алмазоудержания; большей вероятности обработки «мягких» граней кристаллитов СТМ, что обеспечивает повышение производительности шлифования и сокращение удельного расхода алмазов. Отсюда вытекает необходимость подбора оптимального сочетания пар «марка СТМ – марка зерна» для интенсификации требуемого вида приспособляемости, поскольку удельный износ (соотношение объемов разрушенных зерен и объема СТМ) отличается от удельного расхода для различных материалов в 20 – 30 раз. Чем выше модуль упругости связки, тем большая часть подводимой в зону шлифования энергии перераспределяется в обрабатываемый поликристалл и алмазное зерно, тем большая вероятность их разрушения, тем выше производительность обработки.

Теоретически обосновано и экспериментально доказано, что можно минимизировать брак из-за растрескивания обрабатываемой поверхности СТМ за счет перераспределения подводимой в зону шлифования энергии между элементами системы, т.е. управляя уровнем энергетической приспособляемости.



## **Топографическая приспособляемость рабочих поверхностей в зоне шлифования**

В главе приводится теоретико-экспериментальный анализ топографической приспособляемости 3D параметров топографии рабочей поверхности круга (РПК) и обрабатываемой поверхности сверхтвердого материала (СТМ) при алмазном шлифовании. Подчеркивается определяющая роль топографической составляющей процесса приспособляемости. Излагается методология теоретико-экспериментального определения фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ», влияния анизотропии физико-механических свойств алмазных зерен на интенсивность их износа и изменение параметров РПК. Приведено теоретическое обоснование возможности управления величиной фактической площади контакта. Анализируются теоретические зависимости, описывающие взаимосвязь и изменение топографических параметров приспособляемости.

### **6.1. Теоретический анализ топографической приспособляемости при шлифовании СТМ**

Величина контактных давлений при взаимодействии РПК с обрабатываемым СТМ определяется числом зерен в контакте и общей нагрузкой, которая задается либо поперечной подачей (жесткая схема), либо нормальным давлением (упругая схема). Число зерен в контакте с обрабатываемым СТМ зависит от общего количества зерен на единице площади РПК и (применительно к шлифованию сверхтвердых материалов) от рабочей высоты выступания зерен, т.е. от развитости режущего рельефа круга.

Особенность предлагаемого подхода определяется предельным состоянием системы: закономерности износа круга устанавливаются для условий практического отсутствия внедрения алмазных зерен в обрабатываемый материал (твердости обрабатываемого и инструментального материалов одинаковы) и



отсутствия контакта связки с СТМ; алмазные зерна изнашиваются только в пределах одной высоты их выступания из связки. Комплексный теоретический и экспериментальный анализ изменения топографических параметров рабочей поверхности круга и СТМ проводился с использованием 3D моделирования с учетом ранее установленной чрезвычайно высокой интенсивности процесса приспособляемости. В единую систему взаимодействия объединены рабочая высота зерен, число зерен на РПК, в контакте с СТМ, критическая величина их заделки в связку, относительная величина фактической площади контакта РПК с СТМ. Эти зависимости необходимы для разработки теоретического модуля экспертной системы процесса шлифования СТМ.

В основу расчета числа зерен на РПК положено равномерное распределение их в связке и объемное содержание в алмазоносном слое (концентрация). Придерживаясь выбранной методологии 3D моделирования, теоретические расчеты параметров рабочей поверхности круга рассматривались не в ее сечении, а на поверхности (рис. 6.1 а). Алмазное зерно моделировалось в форме октаэдра – наиболее распространенной форме алмазного кристаллита с размерами  $a$  и  $H$  (соответственно для зернистости 200/160  $H = 200$ ,  $a = 160$ ) (рис. 6.1 в, г).

Поскольку в производительном процессе шлифования контакт связки с СТМ отсутствует, величина фактической площади контакта РПК с СТМ на макроуровне определяется только величиной опорной поверхности алмазных зерен, т. е. суммарной величиной площадок износа  $\sum S_i$  на них.

Зерна в круге с концентрацией 100 % ( $K = 4$ ) занимают одну четвертую часть объема алмазоносного слоя. При моделировании зерна и приходящегося на него объема алмазоносного слоя в виде шара или куба, исходя из концентрации алмазов в круге, получим:

$$\frac{r^3}{R^3} = \frac{a^3}{A^3} = \frac{K}{16}, \quad (6.1)$$

где  $K$  – коэффициент концентрации (100 %  $K = 4$ ; 50 %  $K = 2$  и т. д.);

$R$  – радиус шара алмазоносного слоя с одним зерном;

$r$  – радиус алмазного зерна;

$A$  – сторона куба объема алмазоносного слоя с одним зерном;

$a$  – сторона кубического алмазного зерна.

Тогда площадь зерен  $S_3$  на единице сечения алмазоносного слоя  $S$  будет равна:

$$S_3 = S \left( \frac{K}{16} \right)^{2/3}, \quad (6.2)$$

где  $S$  – единичная площадь поверхности РПК.

После условного «разрыва» (рис. 6.1 б) алмазоносного слоя на поверхности РПК останется половина зерен, т. е. опорная площадь зерен  $S_3$  будет равна:

$$S_3 = \frac{1}{2} S \left( \frac{K}{16} \right)^{2/3}. \quad (6.3)$$

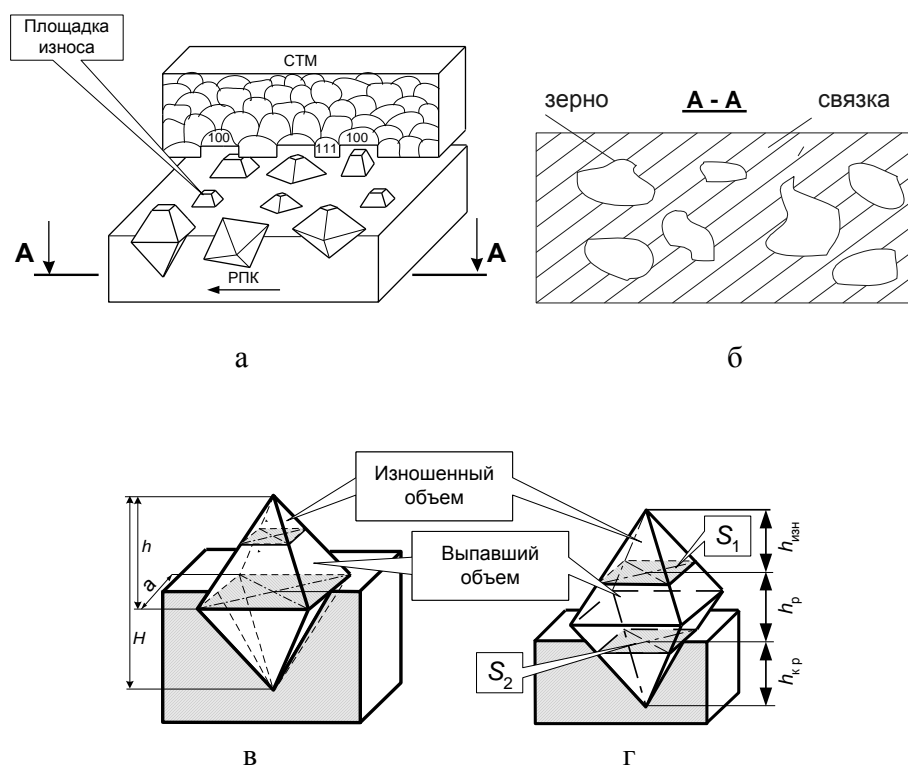


Рис. 6.1 – К расчету параметров топографии рабочей поверхности круга:

а – расчетная схема; б – сечение алмазоносного слоя;  
в, г – расчетные схемы системы «зерно–связка»

Это справедливо при максимальной высоте выступления зерен из связки, равной  $0.5 H_3$ , где  $H_3$  – максимальный размер зерна. Рабочая высота зерен теоретически может быть равной  $h_p = \alpha \cdot H_3$ , где  $\alpha$  – относительная высота выступления зерен из связки ( $\alpha = 0 \dots 1$ , т. е. в рассматриваемом случае  $\alpha = 0.5$ ).

Площадь сечений зерен в плоскости разрыва (опорная площадь профиля) равна

$$\sum_1^n S_{3_i} = \alpha S \left( \frac{K}{16} \right)^{2/3}. \quad (6.4)$$

Величина фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ» в большой степени определяется величиной относительной опорной площади РПК  $t_{ps}$ . Под величиной  $t_{ps}$  приняли (по аналогии со стандартным параметром шероховатости поверхности  $t_p$ ) отношение величины суммы площадей площадок износа на зернах на заданном уровне  $P$  % от  $h_{\max}$  (степень износа зерен круга)  $\eta_3 = \sum S_i$  к номинальной площади базового участка  $A_c$ :

$$t_{ps} = \frac{\sum S_i}{A_c} \cdot 100 \%, \quad (6.5)$$

где  $S_i = a_i^2$ .

По мере износа круга (увеличения  $\Delta h_i$ ) величина  $S_i$  будет расти. Расчетная схема для определения величины  $t_{ps}$  в зависимости от критической величины заделки зерен в связку  $h_{кр}$  и рабочей высоты зерен  $h_p$  представлена на рис. 6.2 а.

Тогда относительная опорная площадь РПК

$$t_{ps} = \frac{\alpha}{S} \left( \frac{K}{16} \right)^{2/3} \cdot 100 \%. \quad (6.6)$$

При различной высоте выступания зерен из связки величина  $t_{ps}$  для круга 100 % концентрации теоретически может меняться (при изменении  $a$  от 0 до 1) от 0 до 39.73 %. Таким образом, если «вскрывать» круг электрохимическим способом, величина  $t_{ps}$  теоретически (при допущении, что критическая величина заделки зерна в связку  $h_{кр}$  может быть равной 0) будет возрастать на уровне связки от 0 до 19.84 %. Аналогично можно получить выражение для относительной опорной длины профиля РПК  $t_p$ :

$$t_p = \alpha \left( \frac{K}{16} \right)^{1/3} \cdot 100 \%. \quad (6.7)$$

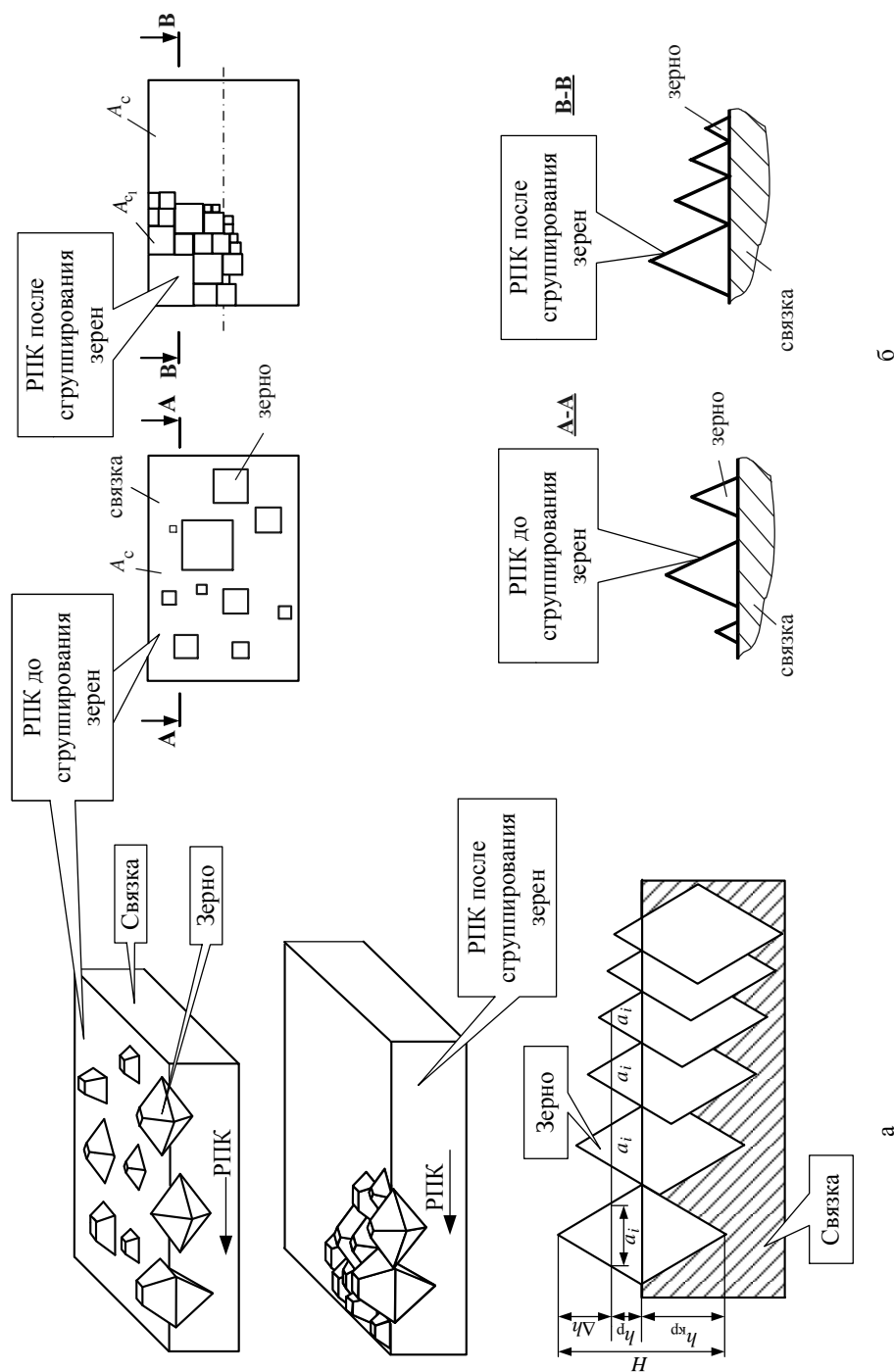


Рис. 6.2. – Определение фактической площади контакта в системе «РПК-СТМ»: а – исходная модель РПК; б – изменяющаяся модель РПК

С увеличением высоты выступания зерен  $t_p$  может меняться от 0 до  $\approx 63\%$ . При высоте выступания зерен  $h_p = 0.5 l_3$ , величина  $t_p$  не может быть больше 32 %. В этих расчетах установлено принципиальное отличие в определении относительной опорной длины профиля РПК, выполненных Поповым С. А. и другими авторами, у которых она равнялась 100 % [29]. Это отличие объясняется тем, что они рассматривали профили РПК без разделения зерен и связки.

При отсутствии внедрения алмазных зерен в обрабатываемый материал в контакте будут находиться только максимально выступающие зерна (точнее вершины зерен), находящиеся в диапазоне величины их вдавливания в связку  $\Delta h$ . Тогда число контактирующих с СТМ вершин зерен может измениться в процессе шлифования только за счет: 1) износа (разрушения) вершин зерен верхнего уровня и перехода этих вершин в следующий уровень, т. е. суммирование от уровня к уровню; 2) упругого вдавливания зерен верхнего уровня и перехода вершин этого уровня на следующий.

Износ зерен в круге после вскрытия (например, электрохимическим способом) происходит только в пределах одной высоты их выступания над уровнем связки. При этом все зерна на рабочей поверхности разделим на 4 группы: I – зерна, выпавшие до касания с СТМ, II – зерна, выпадающие в первый момент шлифования (у них величина заделки в связку ( $h_3$ ) меньше критической ( $h_{кр}$ )), III – зерна, активно работающие, IV – зерна над связкой после образования пары трения «алмаз–алмаз». Совпадение характера изменения закона распределения опорной площади зерен по мере износа круга, полученных расчетным методом с помощью системы моделирования, разработанной Доброскоком В. Л. [55], и методом лазерного сканирования (см. рис. 4.1–4.3), убедительно подтверждают достоверность выбранной расчетной схемы.

В первый период шлифования вскрытым кругом из связки выпадут зерна, величина заделки которых  $h_3$  будет меньше критической  $h_{кр}$ . При дальнейшем шлифовании выпадение из связки зерен маловероятно, т.к. число их в контакте будет постоянно расти, а, следовательно, нагрузка на единичное зерно уменьшается и в работу будут вступать зерна с увеличенной заделкой в связку. По мере износа зерен величина  $t_p$  и  $t_{ps}$  на поверхности контакта с СТМ будет расти. Определим зависимость  $t_{ps}$  от величины рабочей высоты зерен, т. е. в процессе износа круга, используя расчетную схему, представленную на рис. 6.2 а.

**Примечание [V367]:** Стр: 211  
[a№56] Попов С.А., Малевский Н.П.,  
Терещенко Л.М. Алмазно-абразивная  
обработка металлов и твердых сплавов. -  
М.: Машиностроение, 1977. - 263 с.  
{Book: Date 03/09/02 Time 22:06:42}

Из подобия треугольников получим текущую величину  $t'_{ps}$ :

$$t'_{ps} = \frac{\alpha(H_3 - h_p)}{H_3} \left( \frac{K}{16} \right)^{2/3} \cdot 100 \% . \quad (6.8)$$

Примем равномерный закон распределения вершин зерен над уровнем связки и с учетом, что рабочая высота зерен  $h_p = aH_3 = H_3 - h_{кр}$ , получим:

$$t_{ps} = \frac{(H_3 - h_{кр} - h_p)}{H_3} \left( \frac{K}{16} \right)^{2/3} \cdot 100 \% . \quad (6.9)$$

Изменения величины относительной опорной площади поверхности РПК  $t_{ps}$  от величины критической заделки зерен в связку, их концентрации и рабочей высоты, полученные расчетным путем (расч) и методом лазерного сканирования (эксп), приведены в табл. 6.1–6.2.

Таблица 6.1 – Результаты теоретического (расч) и экспериментального (эксп) определения относительной опорной площади РПК

Относительная опорная площадь РПК, %	Рабочая высота зерен $h_p = al_3$						
	$a = 0$	$a = 0.1$	$a = 0.2$	$a = 0.3$	$a = 0.4$	$a = 0.5$	$a = 0.6$
$t_{ps}$ (расч)	12.5	9.8	7.2	4.9	3.2	2.5	1.2
$t_{ps}$ (эксп)	12.3	9.7	7.0	4.5	3.1	2.4	1.1
	Концентрация, %						
	10	20	30	50	100	150	200
$t_{ps}$ (расч)	0.25	0.71	0.82	1.25	2.5	3.75	5.0
$t_{ps}$ (эксп)	0.23	0.69	0.78	1.21	2.42	3.62	4.83
	Нормальное давление $P_H$ , МПа						
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
$t_{ps}$ (расч)	1.25	2.34	3.45	4.21	6.25	7.5	12.6
$t_{ps}$ (эксп)	1.18	2.17	2.37	4.11	6.19	7.64	12.5
	Относительная критическая величина заделки $h_{кр} = al_3$						
	$a = 0.2$	$a = 0.3$	$a = 0.4$	$a = 0.5$	$a = 0.6$	$a = 0.7$	$a = 0.8$
$t_{ps}$ (расч)	10.0	8.5	7.5	5.1	2.5	1.32	0.7
$t_{ps}$ (эксп)	9.89	8.61	7.48	4.6	3.47	1.29	0.66

Таблица 6.2 – Зависимость опорной площади зерен от их рабочей высоты на участке поверхности круга площадью 100 мм<sup>2</sup>

$\epsilon_{кр}$	Зернистость	$h_{\max}$ , мкм	Количество зерен по глубине от наиболее выступающего зерна				
			$0.1h_{\max}$	$0.2h_{\max}$	$0.3h_{\max}$	$0.4h_{\max}$	$0.5h_{\max}$
0.2	50/40	51.684	0.0082	0.1072	0.5670	1.9099	4.4858
	80/63	85.021	0.0072	0.0784	0.4312	1.6029	3.9715
	100/80	103.118	0.0073	0.0956	0.5418	1.8256	4.3724
	200/160	202.622	0.0069	0.0934	0.5564	1.9340	4.5824
	315/250	321.013	0.0084	0.1062	0.6037	1.9866	4.6698
0.3	50/40	44.078	0.0018	0.0369	0.2674	1.1326	2.9893
	80/63	75.299	0.0036	0.0505	0.3046	1.1470	2.9262
	100/80	88.447	0.0129	0.1065	0.5304	1.7073	3.7768
	200/160	172.216	0.0142	0.1188	0.6055	1.8912	4.0673
	315/250	275.135	0.0084	0.0960	0.5444	1.8042	3.9804
0.4	50/40	39.415	0.0070	0.0725	0.3817	1.2124	2.7950
	80/63	62.017	0.0081	0.0636	0.3230	1.0657	2.5524
	100/80	72.440	0.0166	0.1397	0.6152	1.6313	3.3845
	200/160	141.945	0.0160	0.1482	0.6543	1.7370	3.5434
	315/250	225.086	0.0151	0.1505	0.6738	1.7814	3.5986
0.5	50/40	31.883	0.0019	0.0281	0.1744	0.6737	1.7347
	80/63	53.070	0.0032	0.0276	0.1638	0.6119	1.6192
	100/80	65.819	0.0022	0.0258	0.1631	0.6512	1.7358
	200/160	127.348	0.0022	0.0333	0.1986	0.7695	1.9314
	315/250	202.800	0.0017	0.0309	0.1908	0.7465	1.8648
0.6	50/40	25.140	0.0020	0.0221	0.1383	0.4866	1.1988
	80/63	41.969	0.0023	0.0258	0.1424	0.4951	1.1927
	100/80	49.861	0.0058	0.0545	0.2350	0.6669	1.4641
	200/160	96.190	0.0075	0.0691	0.2835	0.7772	1.6325
	315/250	153.338	0.0066	0.0608	0.2424	0.6901	1.5055

Примечание:  $\epsilon_{кр}$  – коэффициент относительной критической заделки зерен в связке;  $h_{\max}$  – высота наиболее выступающего зерна на исследуемом участке поверхности круга.

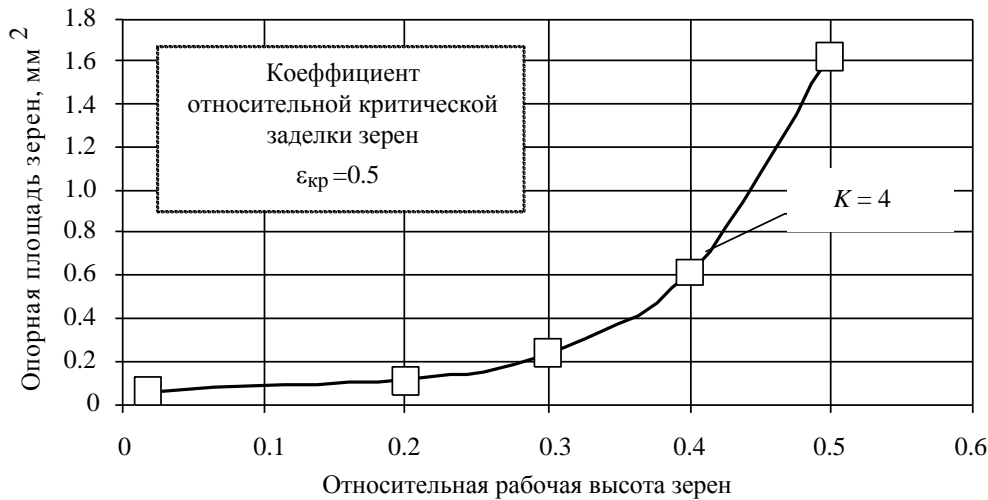


Рис. 6.3. Теоретическая зависимость опорной площади зерен от их высоты

Учитывая, что площадь, занимаемая зернами на единице поверхности РПК  $S_3$ , при  $h_p = 0$  равна

$$\sum S_3 = \frac{(H_3 - h_{кр})S}{H_3} \left( \frac{K}{16} \right)^{2/3}, \quad (6.10)$$

получим выражение для числа зерен на РПК:

$$n = \frac{(H_3 - h_{кр})S}{H_3 S_3} \left( \frac{K}{16} \right)^{2/3}, \quad (6.11)$$

где  $S_3$  — средняя площадь сечения зерна. Для зерна в форме октаэдра в сечении будет квадрат со стороной  $a$ , тогда:

$$n = \frac{S(H_3 - h_{кр})}{H_3 a^2} \left( \frac{K}{16} \right)^{2/3}. \quad (6.12)$$

Расчетные (расч) и модельные (мод) зависимости числа зерен  $n$  на  $1 \text{ см}^2$  РПК от коэффициента относительной критической величины и заделки в связку приведены в табл. 6.3.

Однако практический интерес представляет не только число зерен на рабочей поверхности круга, но и число зерен, находящихся в контакте с обрабатываемым СМТ. В нашем случае это число зерен на уровне их рабочей высоты  $h_p$ . Примем равномерный закон распределения вершин зерен по глубине рабо-



чей поверхности, а рабочую величину зерен будем определять в относительных величинах от максимального размера зерна как  $h_p = \alpha H_z$ , где  $\alpha$  – коэффициент относительной высоты выступания зерен ( $\alpha = 0 - 1$ ). Тогда зависимость числа зерен в контакте от их рабочей высоты, т. е. в зависимости от уровня износа круга будет иметь вид:

$$n = \frac{2\alpha S(H_z - h_{кр})}{H_z a^2} \left( \frac{K}{16} \right)^{2/3}. \quad (6.13)$$

Таблица 6.3 – Количество зерен на поверхности круга, полученное по расчетным зависимостям (расч.) и путем статистического моделирования (мод.)

Зернистость	Количество зерен на рабочей поверхности круга площадью $100 \text{ мм}^2$ при коэффициенте относительной критической заделки зерен в связке $\xi_{кр}$									
	$\xi_{кр} = 0.2$		$\xi_{кр} = 0.3$		$\xi_{кр} = 0.4$		$\xi_{кр} = 0.5$		$\xi_{кр} = 0.6$	
	расч.	мод.	расч.	мод.	расч.	мод.	расч.	мод.	расч.	мод.
50/40	17857	18668	15625	16268	13393	13956	11161	11641	8928	9372
80/63	7051	7693	6170	6709	5289	5749	4407	4783	3526	3867
100/80	4464	4924	3906	4320	3348	3714	2790	3081	2232	2468
200/160	2464	2926	1906	1822	1348	1712	790	481	232	271
315/250	1049	1072	943	915	537	562	331	370	225	228

Результаты расчетов изменения числа зерен в контакте по мере износа круга приведены в табл. 6.4. Анализ результатов позволяет сделать вывод о существенной интенсивности изменения числа зерен в контакте в зависимости от их рабочей высоты. Так, уменьшение рабочей высоты зерен в 5 раз приводит к увеличению числа их в контакте более чем в 100 раз. Таким образом, управляя высотой выступания зерен [9], на самом деле управляют числом их в контакте с обрабатываемым СТМ, а, следовательно, величиной фактической площади контакта в системе РПК–СТМ.

Установлено, что величина относительной опорной площади РПК, определяющая на макроуровне величину фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ», зависит не только от высоты выступания зерен  $h_p$ , но и от критической величины их заделки в связку  $h_{кр}$ . При одной и той же рабочей высоте зерен величина фактической площади контакта  $A_f$  СТМ с РПК будет разная для различных связок.

**Примечание [V368]:** Стр: 215  
[a№3006] Грабченко А. И. Научные основы алмазного шлифования сверх-твердых поликристаллических материалов: Диссертация в форме научного доклада докт. техн. наук: 05.03.01. - Харьков, 1995. - 59 с. {Book: Date 03/09/02 Time 22:11:09}

Таблица 6.4 – Зависимость количества зерен в контакте от их относительной критической заделки и рабочей высоты выступания зерен на участке поверхности площадью 100 мм<sup>2</sup>

$\epsilon_{кр}$	Зернистость	$h_{max}$ , мкм	Количество зерен по глубине от наиболее выступающего зерна				
			$0.1h_{max}$	$0.2h_{max}$	$0.3h_{max}$	$0.4h_{max}$	$0.5h_{max}$
0.2	50/40	51.684	52	353	1411	3248	5620
	80/63	85.021	18	118	468	1202	2159
	100/80	103.118	6	90	331	846	1483
	200/160	202.622	1.8	24	87	226	385
	315/250	321.013	0.8	9	35	90	155
0.3	50/40	44.078	61	382	1348	3033	5143
	80/63	75.299	13	90	362	958	1798
	100/80	88.447	22	103	369	819	1363
	200/160	172.216	6	30	106	223	360
	315/250	275.135	2.2	10	38	87	143
0.4	50/40	39.415	18	189	837	2186	3967
	80/63	62.017	16	112	394	954	1727
	100/80	72.440	33	154	409	825	1314
	200/160	141.945	8	42	112	217	340
	315/250	225.086	3	17	46	88	137
0.5	50/40	31.883	38	247	879	2030	3544
	80/63	53.070	8	69	247	718	1354
	100/80	65.819	2	52	174	499	898
	200/160	127.348	0.5	14	53	143	241
	315/250	202.800	0.1	6	20	55	93
0.6	50/40	25.140	33	215	799	1796	3004
	80/63	41.969	6	69	276	638	1136
	100/80	49.861	17	85	233	498	832
	200/160	96.190	4	28	69	141	225
	315/250	153.338	2	10	26	53	86

Примечание:  $\epsilon_{кр}$  – коэффициент относительной критической заделки зерен в связке;  $h_{max}$  – высота наиболее выступающего зерна на исследуемом участке поверхности круга.

Для оценки точности результатов, получаемых по предложенным зависимостям, для сравнения использовали систему 3D моделирования рабочей поверхности круга, разработанную в [55].

Отклонение значений количества зерен, полученных по зависимостям (6.10)–(6.13), от значений, полученных путем статистического моделирования, составляет 4.3–9.7 %.

Таким образом получены теоретические зависимости для расчета и отслеживания изменения по мере износа круга важных параметров: числа зерен на РПК и относительной опорной площади поверхности  $t_{ps}$  в зависимости от зернистости круга  $H_z$ , концентрации  $K$ , свойств связки, степени износа круга, рабочей высоты зерен  $h_p$  и критической величины их заделки в связке  $h_{кр}$ . Полученные зависимости могут быть успешно использованы для практических расчетов и не требуют большого объема памяти ЭВМ. Они использованы при разработке теоретического модуля экспертной системы процесса шлифования СТМ.

Однако динамика изменения относительной опорной площади РПК может служить только приближенным показателем фактической площади ее контакта с СТМ, т. к. не учитывает микронеровностей поверхностей РПК и СТМ, упругих свойств связки (вдавливания зерен в связку), приводящих к увеличению фактической площади контакта за счет увеличения числа зерен в контакте. Поэтому в теоретическом анализе изменения параметров режущего рельефа круга предусмотрели величину  $\Delta h$  как фактор, учитывающий упругое заглубление зерен в связку и через увеличение их количества в контакте влияющий на величину фактической площади контакта СТМ с РПК (см. рис. 6.2 а).

Если зерна упруго вдавливаются в связку на величину  $\Delta h = cH_z$ , где  $c$  – коэффициент упругого вдавливания зерна в связку, то число зерен в контакте определится следующим выражением:

$$n = \frac{S(\alpha + c)K}{a^2}. \quad (6.14)$$

Таким образом, получены теоретические зависимости относительной опорной длины  $t_p$  и площади  $t_{ps}$  от рабочей высоты зерен  $h_p$  и критической величины заделки их в связке  $h_{кр}$ , и числа зерен на РПК  $n$  от уровня вскрытия круга и его износа.

Относительная опорная площадь РПК  $t_{ps}$  и динамика ее изменения в процессе износа круга в дальнейшем принята в качестве контурной площади контакта зерен с СТМ  $A'_c$  при определении фактической площади контакта.

Поскольку величина фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ» является определяющим параметром эффективности процесса шлифования, проведем ее расчет, используя классическую теорию контактирования шероховатых поверхностей при трении и износе, разработанную Демкиным Н. Б. и Крагельским И. В. [20, 39].

## 6.2. Изменение фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ» в процессе приспособляемости

Поскольку фактическая площадь контакта «РПК–СТМ» зависит от размеров обрабатываемой заготовки, то в качестве определяющего параметра, характеризующего топографическую приспособляемость, приняли относительную величину фактической площади контакта:

$$\eta_3 = \frac{A_r}{A_a} = \eta_1 \eta_2; \quad \eta_1 = \frac{A_r}{A_c}; \quad \eta_2 = \frac{A_c}{A_a}, \quad (6.15)$$

где  $\eta_1$  – относительная величина фактической площади контакта на микроуровне;

$\eta_2$  – относительная величина фактической площади контакта на макроуровне;

$A_a$  – номинальная площадь контакта;

$A_c$  – контурная площадь контакта;

$A_r$  – фактическая площадь контакта.

Рассмотрим систему «связка–зерно–СТМ».

Расчетная схема модели взаимодействия системы «РПК–СТМ» представлена на рис. 6.1а; СТМ представлен в виде отдельных кристаллитов, поскольку в дальнейшем характер взаимодействия зерен с обрабатываемым материалом будет учитывать анизотропию свойств кристаллитов и алмазных зерен. Различная интенсивность износа «твердых» и «мягких» граней кристаллитов и зерен будет сказываться на величине фактической площади контакта в системе «зерно–СТМ».

**Примечание [V369]:** Стр: 218  
[a№384] Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. - М.: Машиностроение, 1977. - 526 с. {Book: Date 03/09/02 Time 22:15:09}

**Примечание [V370]:** Стр: 218  
[a№166] Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В 2-х кн. Кн. 2. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисына. - М.: Машиностроение, 1979. - 358 с. {Book: Date 03/09/02 Time 22:16:38}

Определение фактической площади контакта РПК с СТМ и ее изменение в процессе шлифования представляет интерес не с точки зрения оценки глубины внедрения зерен в обрабатываемый материал (оно практически отсутствует), или определения толщины среза (как это принято для традиционных процессов шлифования), а для определения величины контактных давлений, ответственных за характер и интенсивность взаимного микроразрушения контактирующих тел.

Поскольку в контакте находятся принципиально различные по топографии поверхности: РПК – дискретная и СТМ – квазисплошная, определение фактической площади контакта будем проводить в два этапа. На первом этапе определим фактическую площадь контакта на макроуровне (площадки износа на зернах и поверхность СТМ принимаются идеально гладкими), а на втором этапе, приняв ранее определенную площадь за контурную, определим фактическую площадь контакта на микроуровне с учетом шероховатости СТМ и субмикрорельефа алмазных зерен. Расчетные схемы представлены на рис. 6.4 а, б, в. За контурную площадь контакта на макроуровне (РПК–СТМ) примем опорную площадь рабочей поверхности круга  $A_c$ . Она может характеризоваться величиной относительной опорной площади РПК  $t_{ps}$ , получаемой лазерным сканированием.

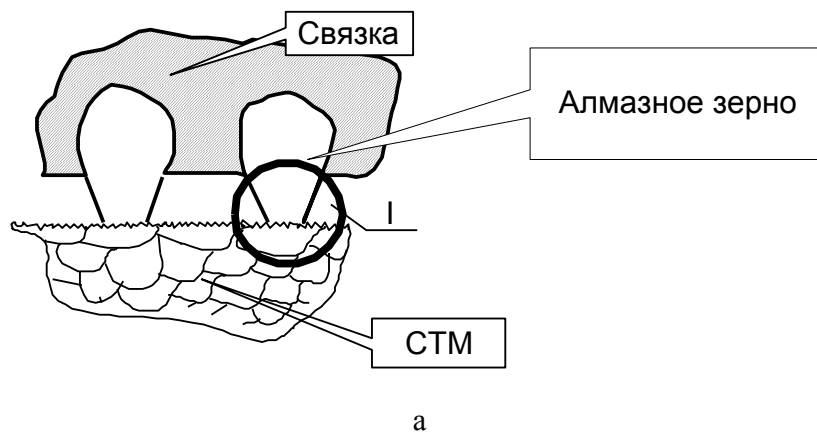


Рис. 6.4. Определение фактической площади контакта в системе «СТМ–РПК»:  
а – расчетная схема взаимодействия РПК с поверхностью СТМ;

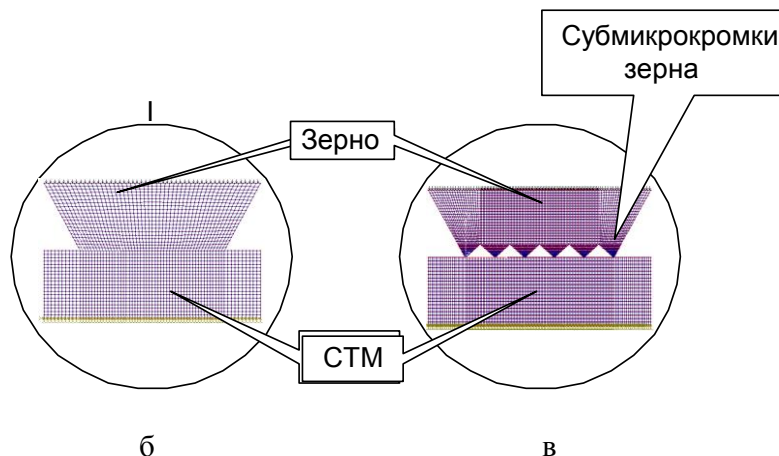


Рис. 6.4. Определение фактической площади контакта  
в системе «СТМ–РПК» (продолжение):  
б, в – конечноэлементная модель системы «зерно–СТМ»

С учетом схожести процесса алмазного шлифования СТМ с функционированием триботехнических систем, воспользовались модернизированными зависимостями для определения фактической площади контакта в этих системах [39]. Демкин Н. Б. показал, что отношение фактической площади контакта  $A_r$  к контурной  $A_c$  достаточно точно описывается зависимостью [12]:

$$\frac{A_r}{A_c} = ab\epsilon^\delta, \quad (6.16)$$

где  $b$  и  $\delta$  – параметры кривых опорных поверхностей контактирующих тел;

$\epsilon$  – относительное сближение ( $\epsilon = h / h_{\max}$ ).

Существенные различия в параметрах топографии РПК и СТМ делают зависимости определения параметров опорной кривой [12] для дискретной поверхности РПК не корректными. В связи с этим провели их модернизацию, заключающуюся в искусственном группировании алмазных зерен, т. е. заменив дискретную поверхность РПК квазисплошной и приняв за контурную площадь контакта величину относительной опорной площади поверхности  $t_{ps}$ , значения и динамика изменения которой получена нами ранее. В качестве модуля упругости контактирующих тел использовали не свойства зерен и СТМ (на этом этапе упругими деформациями в зерне и СТМ пренебрегаем), а модуль упруго-

**Примечание [V371]:** Стр: 220  
[a№166] Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. Кн. 2. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Аликина. - М.: Машиностроение, 1979. - 358 с. {Book: Date 03/09/02 Time 22:17:04}

**Примечание [V372]:** Стр: 220  
[a№3041] Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. - М.: Наука, 1970. - 227 с. {Book: Date 03/09/02 Time 22:17:31}

**Примечание [V373]:** Стр: 220  
[a№3041] Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. - М.: Наука, 1970. - 227 с. {Book: Date 03/09/02 Time 22:21:34}

сти металлической связки. В результате получили зависимости для определения фактической площади контакта и динамику ее изменения в процессе приспособляемости. Причем, эта задача решается как на макроуровне – контакт «РПК – СТМ», так и на микроуровне – контакт «СТМ–субмикрорельеф площадки износа на зернах» (см. рис. 6.4 а, б, в). Шероховатость площадки износа алмазного зерна измеряли методом лазерного сканирования.

При рассмотрении контактирования РПК и СТМ на макроуровне сделали допущение, что материал зерна и СТМ абсолютно жесткий (что для алмазных структур близко к истине), а изменение фактической площади контакта происходит только за счет изменения параметров опорной поверхности РПК (износа зерен) и упругого вдавливания их в связку круга. Поскольку «шероховатость» РПК на несколько порядков больше шероховатости СТМ, последней на первом этапе пренебрегаем.

С учетом этого формула Демкина Н. Б. для фактической площади контакта будет иметь следующий вид:

$$A_r = A_c \left\{ \frac{2.35b^{\frac{1}{2\delta}} r^{\frac{1}{2}} (1-\mu^2) N}{2^{\frac{1}{2\delta}} K_2 h_{\max}^2 F A_c} \right\}^{\frac{2\delta}{2\delta+1}}, \quad (6.17)$$

где  $K_2$  – постоянная интегрирования, величина, которая зависит от численного значения  $\delta$ ;  $N$  – нормальная нагрузка, Н;  $\mu$  – коэффициент Пуассона связки;  $E$  – модуль упругости связки, ГПа;  $r$  – радиус кривизны вершин зерен, мкм;  $h_{\max}$  – максимальная высота выступания зерен из связки;  $b$  и  $\delta$  – параметры опорной кривой рельефа РПК.

Для определения величины  $A_c$  искусственно заменили существенно дискретную поверхность РПК на непрерывную, т. е. сгруппируем зерна вплотную друг к другу (см. рис. 6.2).

Параметры опорной кривой топографии РПК  $b$  и  $\delta$  определены теоретически:

$$\delta = \frac{3KH_3(H_3 - h_{кр} - Kh_p) + 0.75Kh_p^2}{H_3^2 - h_p H_3}; \quad (6.18)$$

$$b = \left( \frac{0.25K(H_3 - h_{кр})}{H_3} - \frac{0.25Kh_p}{2H_3} \right) \left( \frac{H_3 - h_{кр}}{H_3 - h_{кр} - 0.5h_p} \right)^\delta. \quad (6.19)$$

Радиус округления вершин алмазных зерен

$$r = \frac{(0.0125K(H_3 - h_{кр}))^2}{8(H_3 - h_{кр} - 0.95h_p)}, \quad (6.20)$$

где обозначения соответствуют (6.3)–(6.11).

Для контроля достоверности разработанных методов расчета использовали систему 3D моделирования рабочей поверхности круга, разработанную в [55] и экспериментальную методику лазерного сканирования рабочих поверхностей круга и СТМ.

Расчетные зависимости величины фактической площади контакта  $A_r$  от параметров взаимодействия приведена в табл. 6.5.

Таблица 6.5 – Результаты расчета фактической площади контакта

$E$	70	90	110	130	150	200
$A_r$	4.08	3.23	2.77	2.4	2.13	1.44
$r$	10	20	30	40	50	100
$A_r$	0.77	1.29	1.75	2.17	2.57	4.32
$N$	10	20	30	40	50	100
$A_r$	1.98	2.51	3.11	3.98	4.8	5.64
$h_p$	5	10	20	30	40	50
$A_r$	7.27	4.32	2.57	1.9	1.53	1.1

Примечание:  $E$  – модуль упругости связки, ГПа;  $r$  – радиус кривизны вершин зерен, мкм;  $N$  – нормальная нагрузка, Н;  $h_p$  – рабочая высота зерен.

Таким образом, разработанная методика и полученные зависимости, основанные на искусственной замене дискретной поверхности РПК – непрерывной и учитывающая упругое заглубление алмазных зерен в связку и ее изменение в процессе износа круга, позволяют определять фактическую площадь контакта РПК с СТМ. Двухэтапный метод 3D экспериментально-теоретического определения фактической площади контакта РПК с СТМ в условиях отсутствия внедрения зерен в обрабатываемый материал и контакта его со связкой учитывает субмикрорельеф алмазных зерен и СТМ. На первом этапе рассчитывается фактическая площадь контакта «РПК–СТМ» на макроуровне через относитель-



ную опорную площадь профиля, а затем, приняв ее за контурную, применяя модернизированную методику расчета параметров дискретной относительной опорной поверхности РПК ( $b$  и  $\gamma$ ), проводился расчет фактической площади контакта на микроуровне «СТМ–микрорельеф зерен» по известным зависимостям Демкина Н. Б. и Крагельского И. В. При этом в качестве характеристики жесткости системы использовался модуль упругости металлической связки. Результаты расчета приведены в табл. 6.5.

Сравнение результатов расчета с результатами лазерного сканирования поверхности круга и СТМ показал достоверность принятой расчетной схемы для определения фактической площади контакта РПК с обрабатываемым СТМ. Установлено, что в процессе приспособляемости с изменением параметров режущего рельефа круга фактическая площадь контакта  $A_r$  может изменяться на несколько порядков, соответственно будет меняться и удельное давление в контакте алмазных зерен с СТМ, и, следовательно, характер и интенсивность их взаимного разрушения.

Если сравнить величину фактической площади контакта  $A_c$ , полученную расчетным путем, с величиной относительной опорной площади профиля  $t_{ps}$ , полученной методом лазерного сканирования, можно отметить, что различие в этих величинах определяется величиной упругого вдавливания алмазных зерен в связку. Достаточно высокая сходимость результатов расчетов по этим различным методикам доказывает, что характер износа алмазных зерен приводит к образованию площадок износа и зерна из связки после начала шлифования (5–10 с) практически не выпадают.

Полученные зависимости для определения фактической площади контакта РПК с СТМ могут быть использованы при моделировании процессов разрушения зерен и обрабатываемого материала при шлифовании и в теоретическом модуле экспертной системы процесса шлифования СТМ. Управляя рабочей высотой зерен  $h_p$ , можно управлять величиной фактической площади контакта, а, следовательно, и характером и интенсивностью взаимного хрупкого микроразрушения алмазных зерен и припуска под обработку СТМ.

Результаты расчетов показали, что фактическая величина относительной площади контакта на макроуровне (в случае идеально гладкой поверхности СТМ и площадок износа зерен) не превышает 12.5 %, а после расчетов по зависимостям Демкина Н. Б. и Крагельского И. В. эта величина на микроуровне не превышает 0.125 %. Исходя из этого установлено, что при шлифовании по

упругой схеме при номинальном нормальном давлении  $P_H = 2$  МПа величина фактического давления в контакте «зерно–СТМ» будет не менее  $P_{\text{факт}} = 1600$  МПа. С учетом динамичности процесса величина контактных напряжений будет значительно выше. Если учесть, что трещины в алмазе образуются при растягивающих напряжениях в 5000 МПа [33], то, очевидно, что при таких условиях поликристалл может разрушиться при одноактном взаимодействии.

Таким образом, предложенный подход позволяет оценить не только величину фактической площади контакта РПК с СТМ (а, следовательно, и удельные контактные давления), но и проследить динамику ее изменения по мере износа круга.

Проведенный анализ позволяет оценить среднюю удельную нагрузку на единичное зерно  $P_3$ .

Контактное давление на единичное зерно  $P_3$  будет равно:

$$P_3 = \frac{N}{S_k} = \frac{4N}{KaS}, \quad (6.21)$$

$$P_3 = \frac{4N}{K(a+c)S}. \quad (6.22)$$

Таким образом, установлена величина  $P_3$ , которая является важнейшим параметром эффективности процесса алмазного шлифования СТМ и определяет границу трансформации процесса шлифования из производительного в прецизионное:  $P_3 \geq P_{\text{хр}}$  – характеризует производительное, а  $P_3 < P_{\text{хр}}$  – прецизионное (истирание), где  $P_{\text{хр}}$  – нагрузка на зерно, обеспечивающая его хрупкое микроразрушение.

На основании анализа полученных зависимостей сформулировано и доказано положение о том, что уменьшением рабочей высоты зерен практически до уровня связки – исключая ее контакт с СТМ (для производительного шлифования) с одновременным уменьшением концентрации алмазов в круге, можно не только сохранять величину фактической площади контакта, т. е. выходные показатели процесса шлифования СТМ, но и существенно снизить себестоимость обработки, уменьшив удельный расход и сохранив величину удельного износа,

**Примечание [V374]:** Стр: 224  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И.,  
Ходоревский М.Г. Алмазное шлифова-  
ние синтетических сверхтвердых мате-  
риалов. - Харьков: Вища школа, 1980. -  
192 с. {Book: Date 03/09/02 Time  
22:25:01}

---

т. е. повысить коэффициент использования потенциальных режущих свойств алмазных зерен.

### 6.3. Экспериментальное исследование изменения параметров топографии поверхности круга и СТМ

Одним из важнейших достоинств метода лазерного сканирования является возможность в 3-х мерном измерении и компьютерном режиме анализировать динамику изменения 86 параметров, в том числе такого важного для нашего процесса, как относительная опорная площадь поверхности  $t_{ps}$ . При этом можно определять величину  $t_{ps}$  как на макроуровне (РПК поверхности круга), так и на микроуровне – микрорельеф отдельных алмазных зерен. Величина субмикрорельефа отдельных алмазных зерен является важным параметром при определении фактической площади контакта в системе «СТМ–зерно», который трудно получить другими способами. А поскольку именно субмикрорельеф алмазных зерен определяет эффективность микроразрушения обрабатываемого СТМ, исследование этого параметра представляется чрезвычайно важным. Результаты исследования изменения 3D параметров рабочей поверхности круга в процессе приспособляемости представлены на рис. 5.1–5.3.

У вновь вскрытого электрохимическим методом круга (см. рис. 5.4)  $t_{ps}$  на уровне  $P = 5\%$  медленно возрастает, что говорит о высокой развитости субмикрорельефа алмазных зерен. Анализировали изменение параметра  $t_{ps}$  по глубине профиля одного и того же круга, но работающего в различных условиях. Так, на рис. 5.5 видно, что  $t_{ps}$  до глубины профиля 25 мкм возрастает незначительно от 0 до 5 % и слабый рост  $t_{ps}$  на максимальной глубине профиля показывает, что износ зерен происходил преимущественно за счет микросколов вершин алмазных зерен, связка прочно удерживает зерна, т. к. глубокие лунки от выпавших зерен редки. Тот же круг после 1 минуты работы имеет множество площадок износа и  $t_{ps}$  резко возрастает и уже на глубине 11 мкм достигает 20 %, а на максимальной глубине профиля  $t_{ps}$  растет менее интенсивно (см. рис. 5.5). На представленной зависимости величины  $t_{ps}$  от высоты зерен можно отчетливо выделить 4 характерных участка. Высота зерен от линии выступов

размером около 5 мкм  $h_1$  характеризуется массовым образованием на зернах площадок износа, участок  $h_2$  – равномерная разновысотность зерен,  $h_3$  – сказываются микронеровности связки и участок  $h_4$  – незначительное количество лунок от выпавших зерен.

А на рис. 5.5  $t_{ps}$  монотонно возрастает до глубины профиля 29 мкм и достигает 20 %, затем в топографию включаются микронеровности связки,  $t_{ps}$  растет более интенсивно до глубины 45 мкм, вместе с тем связка обладает слабым алмазоудержанием и  $t_{ps}$  монотонно возрастает до полной глубины топографии, что свидетельствует о значительном количестве и глубине лунок от выпавших зерен.

Результаты синхронного исследования изменения 3D параметров обработанной поверхности СТМ методом лазерного сканирования представлены на рис. 6.5. Анализ результатов показывает, что за 60 секунд шлифования величина  $t_{ps}$  поверхности СТМ может изменяться в 4–5 раз. Можно предположить, что параметр  $t_{ps}$  является наиболее эффективным при оценке качества обработанной поверхности СТМ по сравнению с традиционно используемыми параметрами  $R_z$  и  $R_a$ .

Синхронное изучение изменения относительной опорной площади РПК и СТМ в процессе шлифования позволяет по этим параметрами проследить изменение величины фактической площади контакта в системе РПК–СТМ (см. рис. 6.5). По полученным методом лазерного сканирования зависимостям изменения величины относительной опорной площади поверхностей РПК (см. рис. 6.5 г, б) и СТМ (см. рис. 6.5 а, д) можно проследить изменение величины фактической площади их контакта в процессе приспособляемости. Для этого использовали методику, предложенную Я. Качmareком [46] (см. рис. 6.5 в).

Результаты экспериментальных исследований изменения величины фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ» использованы в качестве поправочных коэффициентов в теоретическом модуле экспертной системы процесса шлифования СТМ.

**Примечание [V375]:** Стр: 226  
[a№3325] Kaczmarek J.: Zastosowanie metod SCGC do oceny technologii i prognozy uzytkowania powierzchni obrobionych skawaniem. Prace Miedzynarodowego Sympozjum nt.: «Zagadenia Inzynierii Powierzchni w Obrobce Skawaniem». Wroslaw - Szklarska Poreba, czerwiec 1999. {Book: Date 03/09/02 Time 22:31:10}

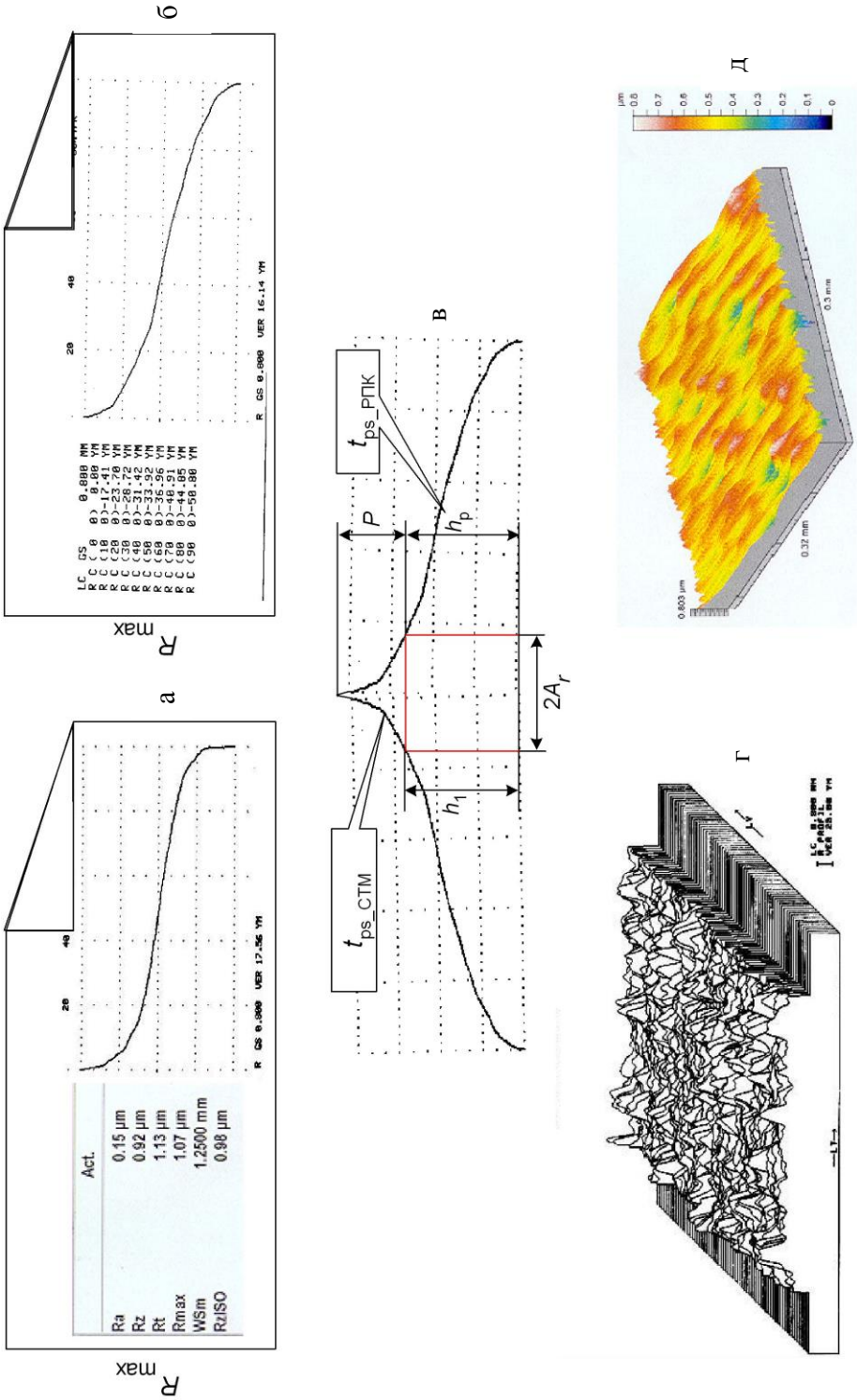


Рис. 6.5. Экспериментальное определение фактической площади контакта в системе «РПК-СТМ»:  
а – относительная опорная площадь топографии СТМ; б – относительная опорная площадь топографии РПК;  
в – суммарные графики относительной опорной площади РПК и СТМ; г – топография РПК; д – топография СТМ

#### 6.4. Взаимосвязь параметров топографии поверхностей в процессе приспособляемости

Ранее установлено, что максимальная производительность процесса достигается при максимальной высоте выступания зерен над связкой  $h_p$ , т. е. вскрытым кругом [37, 165]. Однако анализ показал, что при шлифовании СТМ высокая развитость РПК не требуется, т. к. она не определяет производительность за счет глубины внедрения зерен в ОМ, а объем размещения продуктов шлифования ничтожно мал. В связи с этим высота зерен  $h_p$  должна выбираться из условий контактирования или неконтактирования металлической связки с обрабатываемым материалом. Увеличение рабочей высоты зерен неизбежно приводит к уменьшению величины их заделки в связке и, как следствие, повышенному расходу алмазных зерен. При более глубоком изучении влияния высоты зерен на выходные показатели процесса шлифования установлено, что увеличение  $h_p$  влияет на производительность обработки не за счет глубины внедрения зерен в ОМ и увеличения параметров среза или более благоприятного размещения продуктов шлифования, как это имеет место при обработке других групп материалов, а за счет существенного повышения давления в пятнах контакта «СТМ – зерно» и, как следствие, уменьшения числа циклов до разрушения [71].

Установлено, что высота выступания зерен влияет на интенсивность разрушения (съема) припуска через изменяющиеся числа работающих зерен и фактической площади контакта «СТМ – РПК».

Число работающих зерен определяется их концентрацией в круге  $K$  и рабочей высотой зерен  $h_p$ , т. е. степенью их выступания над уровнем связки:

$$N = f(h_p; K). \quad (6.23)$$

Фактическая площадь контакта кроме этого зависит также от степени износа зерен  $\Delta h$ , т. е. от массовости образования на зернах площадок износа. При управлении РПК имеется возможность стабилизировать рабочую высоту зерен в любом из 3-х этапов интенсивностей их износа  $V_{изн}$ , приравняв эту интенсивность с интенсивностью удаления связки ( $V_{св} = V_{изн}$ ) [6, 60, 165]. Чем меньше рабочая высота зерен, тем больше число их в контакте, и тем больше степень износа (площадок износа) большинства работающих зерен. Удельные нагрузки

**Примечание [V376]:** поверхность круга, ???

**Примечание [V377]:** Стр: 228 [a№802] Грабченко А.И., Русанов В.В. Высокоэффективный комбинированный метод шлифования синтетических сверхтвердых материалов совместно со сталью // Резание и инструмент. 1978. Вып. 19. с. 131-133. {Book: Date 03/09/02 Time 22:35:38}

**Примечание [V378]:** Стр: 228 [a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 20/08/02 Time 12:05:01}

**Примечание [V379]:** Стр: 228 [a№3033] Новиков Н.В., Примак Л.П., Майстренко А.Л., Ващенко А.Д. Исследование распространения усталостных трещин в монокристаллах синтетических алмазов // ДАН СССР. - 1981. Вып. 256. - С. 1122-1126. {Book: Date 03/09/02 Time 14:01:05}

**Примечание [V380]:** Стр: 228 [a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 20/08/02 Time 00:41:40}

**Примечание [V381]:** Стр: 228 [a№3061] Епифанов В.И., Песина А.Я., Зыков Л.В. Технология обработки алмазов в бриллианты. - М.: Высш. шк., 1984. - 319 с. {Book: Date 03/09/02 Time 22:40:16}

**Примечание [V382]:** Стр: 228 [a№3061] Епифанов В.И., Песина А.Я., Зыков Л.В. Технология обработки алмазов в бриллианты. - М.: Высш. шк., 1984. - 319 с. {Book: Date 03/09/02 Time 22:43:15}

**Примечание [V383]:** Стр: 228 [a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 03/09/02 Time 22:40:59}

на единичное зерно снижаются, уменьшается критическая величина их заделки в связке и, как следствие, существенно повышается коэффициент использования алмазных зерен.

Из рис. 6.6 д видно, что одна и та же величина опорной площади РПК  $t_{ps}$ , может быть обеспечена при существенно различных значениях  $h_p$ , т. е. управляя рабочей высотой алмазных зерен, можно управлять величиной  $t_{ps}$ , а, следовательно, и интенсивностью и характером разрушения зерен и СТМ.

Однако, уменьшение рабочей высоты зерен, как отмечено выше, приводит к уменьшению нагрузки на единичное зерно, а, следовательно, снижаются и контактные давления в системе «СТМ – зерно», что, естественно приводит к трансформации характера хрупкого самозатачивания алмазных зерен в процесс их истирания и резкому снижению интенсивности съема припуска. Попытка увеличивать давление в контакте системы «СТМ – зерно» за счет увеличения общей нагрузки в системе «СТМ – РПК» путем увеличения  $S_{\text{поп}}$  или  $P_n$  может приводить к образованию дефектов на обработанной поверхности СТМ в виде сетки микротрещин.

Из всех факторов, определяющих величину фактической площади контакта, наиболее управляемым остается концентрация алмазов в круге. Уменьшая концентрацию, можно уменьшать число зерен в контакте, повышать контактные давления в системе «СТМ – зерно» (не изменяя общей нагрузки на обрабатываемый СТМ), возобновить процесс хрупкого самозатачивания (микро-разрушения) алмазных зерен и, как следствие, интенсифицировать съем припуска.

Если проанализировать полученные зависимости влияния рабочей высоты зерен и концентрации алмазов в круге (см. рис. 6.6 г), то можно констатировать, что концентрация алмазов в круге является наиболее влиятельным фактором интенсификации съема припуска. Это убедительно доказывается (см. рис. 6.6 г) возможностью обеспечения одинаковой производительности ( $Q = 8$  мм/мин) кругом 50 % концентрации и рабочей высотой зерен  $h_p = 65$  мкм, или кругом с 20 % концентрацией и рабочей высотой зерен  $h_p = 30$  мкм.

Видно, что если уменьшить рабочую высоту зерен  $h_p$  в два раза, это равносильно (для величины  $t_{ps}$ ) увеличению концентрации зерен тоже в 2 раза. Таким образом, если по зависимости  $Q = f_1(h_p)$  определим, что максимальная



производительность для круга 200/160 будет при  $h_p = 140$  мкм, то для сохранения того же  $t_{ps}$  при  $h_p = 20$  мкм надо высоту  $h_p$  уменьшить в 7 раз или концентрация круга должна быть не более  $K = 14.2$  %. При одних и тех же условиях удельный расход алмазов сокращается в три раза. Схематическая иллюстрация проведенного анализа влияния рабочей высоты зерен на изменение соотношения изношенной части зерен и выпавших из связки представлена на рис. 6.6 а, б, в.

Сделаем допущение, что увеличение концентрации алмазов в круге соответствует пропорциональному увеличению числа циклов нагружения в контакте «СТМ – зерно» и аналогичному уменьшению давления в контакте. Расчеты показали, что при увеличении нагрузки в контакте в два раза, что соответствует уменьшению концентрации алмазов в круге в два раза, число циклов, необходимое для разрушения припуска СТМ уменьшается, в 10 раз, а число циклов, вызванное уменьшением концентрации, уменьшится только в 2 раза.

Уменьшение концентрации алмазов в круге, даже с учетом уменьшения числа циклов нагружения в контакте «СТМ – зерно», может повысить интенсивность съема припуска в 2 – 3 раза только за счет увеличения давления в контакте.

Таким образом, теоретически обосновано и экспериментально доказано положение о том, что концентрация алмазов в круге, рабочая высота зерен и критическая глубина их заделки в связке являются взаимосвязанными важнейшими факторами процесса алмазного шлифования СТМ. Уменьшение концентрации алмазов в круге до уровня 5 – 20 % с соответствующим уменьшением рабочей высоты зерен до уровня микронеровностей связки и увеличение модуля ее упругости не приводит к ухудшению выходных показателей алмазного шлифования СТМ, т. к. величина фактической площади контакта РПК с СТМ остается неизменной, но существенно снижает удельный расход и себестоимость обработки, повышает степень использования алмазных зерен.

При шлифовании СТМ понятие крупнозернистый и мелкозернистый круг приобретает новое особое понимание, поскольку в процессе микроразрушения припуска СТМ принимает участие не все зерно, а только его субмикрорельеф, т. к. внедрение зерна в ОМ отсутствует. Крупнозернистое зерно с развитым субмикрорельефом может оказаться более эффективным с точки зрения съема припуска, чем мелкое, но с гладкой площадкой, или овалезированное. Поэтому даже крупнозернистым кругом можно осуществлять прецизионную доводочную операцию обработки СТМ. Такой процесс может иметь место при массовом образовании на крупных зернах площадок износа с очень мелким субмик-

рельефом. Такие субмикроромки выполняют роль доводочной алмазной пасты с микроромками, жестко закрепленными в алмазном зерне.

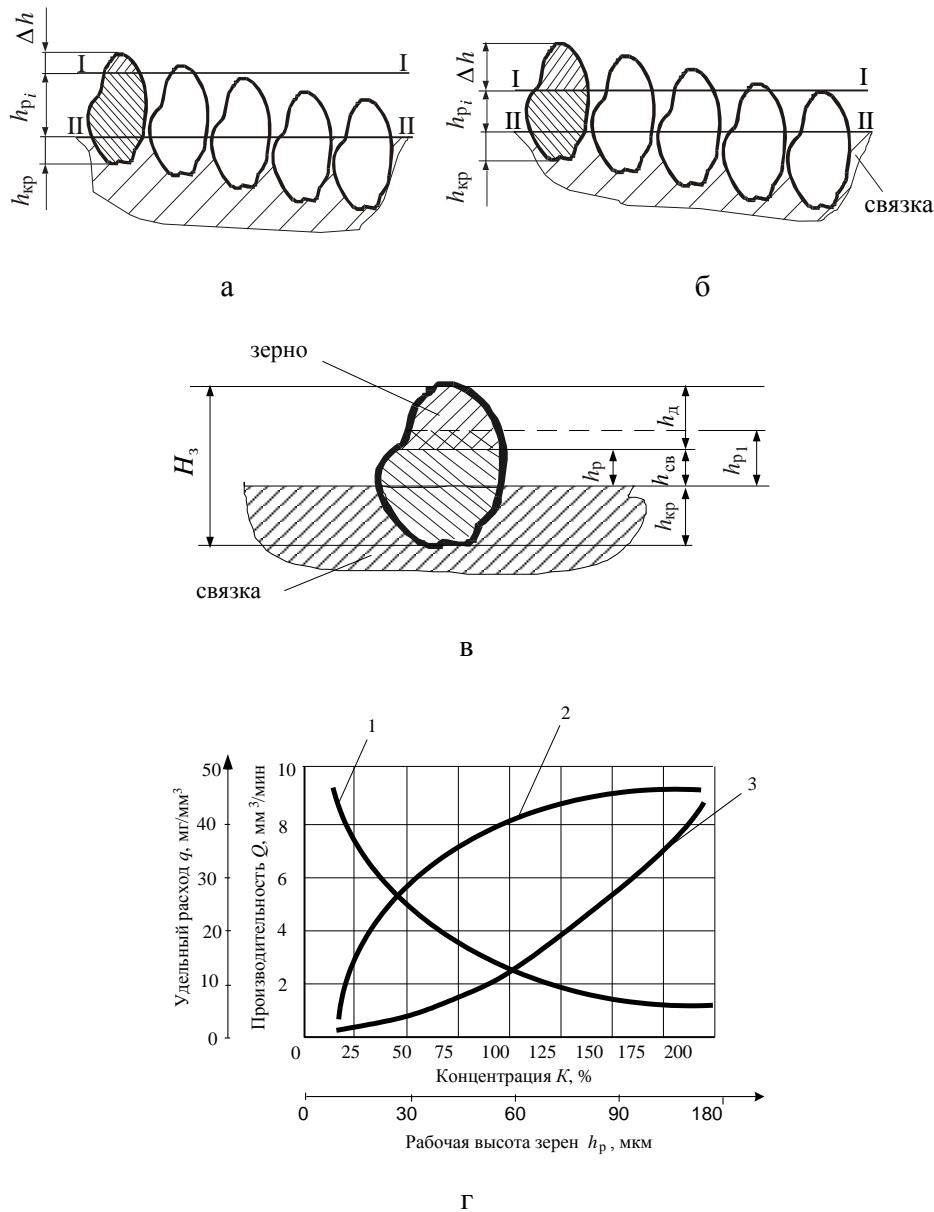
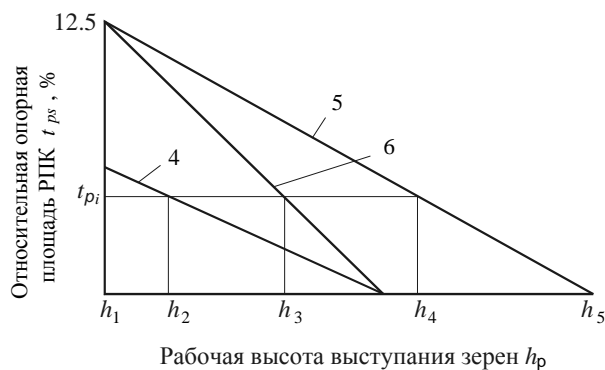


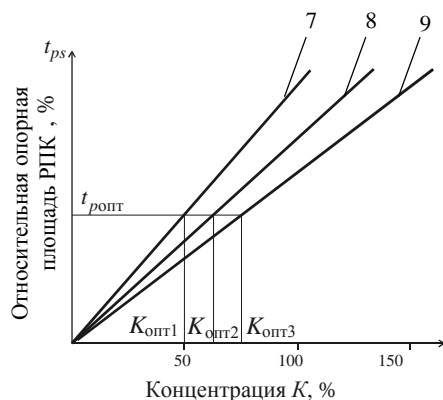
Рис. 6.6. К анализу управляемого процесса шлифования: а, б – модель рабочей поверхности круга; в – модель износа алмазного зерна; г – влияние рабочей высоты зерен и их концентрации на выходные показатели процесса шлифования;

▨ – изношенная часть зерна; ▨ – выпавшая часть зерна

$$1 - Q = f(K); 2 - q = f_1(h_p); 3 - q = f_1(K)$$



д



е

Рис. 6.6. К анализу управляемого процесса шлифования (продолжение): д – влияние рабочей высоты зерен на относительную опорную площадь РПК, е – влияние концентрации зерен на относительную опорную площадь РПК

4 – 100/80 (50 %); 5 – 200/160%; 6 – 180/100 (100%);

7 –  $\alpha = 0.3$ ; 8 –  $\alpha = 0.5$ ; 9 –  $\alpha = 0.7$  (нет ссылки на рис. 6.6 е)

## 6.5. Влияние анизотропии физико-механических свойств алмазных зерен на топографическую приспособляемость РПК

Практически все исследователи при изучении износа алмазных кругов полагали, что интенсивность износа алмазных зерен не зависит от их ориентации по отношению к зоне шлифования, что зерна в процессе работы изнашиваются равномерно. Исходя из этого задавались законы износа рабочей поверхно-

сти круга (РПК), определялось число работающих зерен, величина фактической площади контакта, законы распределения высоты выступания зерен над уровнем связки и т. д. Однако, такое положение является не совсем корректным при алмазном шлифовании СТМ, когда из-за практического равенства твердостей обрабатываемого и инструментального материалов нет внедрения зерен в обрабатываемый материал и взаимный износ равнотвердых материалов в зоне шлифования осуществляется при точечном контакте. Известно, что технология обработки алмазов в бриллианты основана на использовании анизотропии их физико-механических свойств [60, 165]. И кристаллиты поликристаллических алмазных зерен, и монокристаллы обладают существенной анизотропией свойств, присущих алмазам [6, 60]. Анизотропия физико-механических свойств СТМ рассмотрена в 1.3.

В связи с этим правомерно ожидать, что на характер и интенсивность износа единичных алмазных зерен на РПК и съем СТП существенное влияние будет оказывать анизотропия их физико-механических свойств.

Экспериментальные исследования влияния анизотропии на интенсивность износа и микроразрушения алмазных зерен проводились по методике, изложенной в п. 2.7, на специальной установке при микрорезании или микродолблении единичным алмазным зерном в режиме ультразвуковых колебаний (с частотой  $f = 20$  кГц, и амплитудой колебаний  $\alpha = 2$  мкм). При этом скорость микрорезания составляла  $V = 24$  м/мин.

Исследовались зерна марки AC32 зернистостью 1000/600. Изучалась роль анизотропии I рода (на одной грани, но в разных направлениях) поворотом зерна на  $90^\circ$  и II рода – на разных гранях [63]. Результаты исследований показали, что интенсивность износа различных граней алмазных зёрен может различаться в 2 – 5 раз, а в различных направлениях одна грань может изнашиваться с интенсивностью, различной в 3 – 10 раз. Таким образом, интенсивность износа алмазного зерна, ориентированного «мягкой» гранью к обрабатываемой поверхности, может быть в 10 раз выше, чем у зерна, ориентированного «твёрдой» гранью. Это положение убедительно подтверждается и сравнительным анализом расхождений расчетного и экспериментального определения числа зерен в контакте, поскольку в расчетной схеме не учитывается различная интенсивность их износа, вызванная анизотропией свойств.

Введем коэффициент шлифуемости различных граней  $K_n$ , который для «твёрдой» грани (111) примем равным 1. Это относится и к интенсивности

**Примечание [V384]:** уже было в 1.1

**Примечание [V385]:** Стр: 233  
[a№3061] Елифанов В.И., Песина А.Я., Зыков Л.В. Технология обработки алмазов в бриллианты. - М.: Высш. шк., 1984. - 319 с. {Book: Date 03/09/02 Time 22:40:16}

**Примечание [V386]:** Стр: 233  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвёрдых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 03/09/02 Time 22:40:59}

**Примечание [V387]:** Стр: 233  
[a№3025] Карбань В.И., Рогов В.В., Карбань А.И., Соколенко В.С., Шмарин В.М., Шиняева И.П., Горпенко В.И. Анизотропия обрабатываемости монокристаллов // Сверхтвёрдые материалы. - 1981. - № 2. - С. 14-17. {Book: Date 03/09/02 Time 22:42:39}

**Примечание [V388]:** Стр: 233  
[a№3061] Елифанов В.И., Песина А.Я., Зыков Л.В. Технология обработки алмазов в бриллианты. - М.: Высш. шк., 1984. - 319 с. {Book: Date 03/09/02 Time 22:43:15}

**Примечание [V389]:** Стр: 233  
[a№3075] Боярская Ю.Д. Деформирование кристаллов при испытаниях на микротвёрдость. - Кишинев: Штица, 1972. - 235 с. {Book: Date 03/09/02 Time 22:44:18}

**Примечание [V390]:** Стр: 233  
[a№3285] Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряжённом состоянии. - К.: Наук. Думка, 1976. - 415 с. {Book: Date 03/09/02 Time 22:46:03}

съёма припуска с «мягких» и «твёрдых» граней кристаллитов СТМ. Наиболее распространенной формой алмазных кристаллов является октаэдр, затем следует ромбододекаэдр, значительно реже встречается куб [60]. На основании этого модель алмазного зерна выбираем в форме – октаэдра. Анизотропия свойств зерна в форме октаэдра в зависимости от его ориентации к зоне контакта представлена на рис. 6.7 [165].

Самая «мягкая» – грань куба, затем – ромбододекаэдра и октаэдра. Интенсивнее всего будет изнашиваться зерно, ориентированное ребром, затем вершиной и затем гранью. Так, у алмазного зерна в форме октаэдра при ориентации его вершиной к СТМ имеются 2 «мягких» и 2 «твёрдых» направления, при ориентации гранью – 3 и 3, а ребром – 1 и 1.

**Примечание [V391]:** Стр: 234  
[a№3061] Епифанов В.И., Песина А.А.,  
Зыков Л.В. Технология обработки алма-  
зов в бриллианты. - М.: Высш. шк., 1984.  
- 319 с. {Book: Date 03/09/02 Time  
22:46:41}

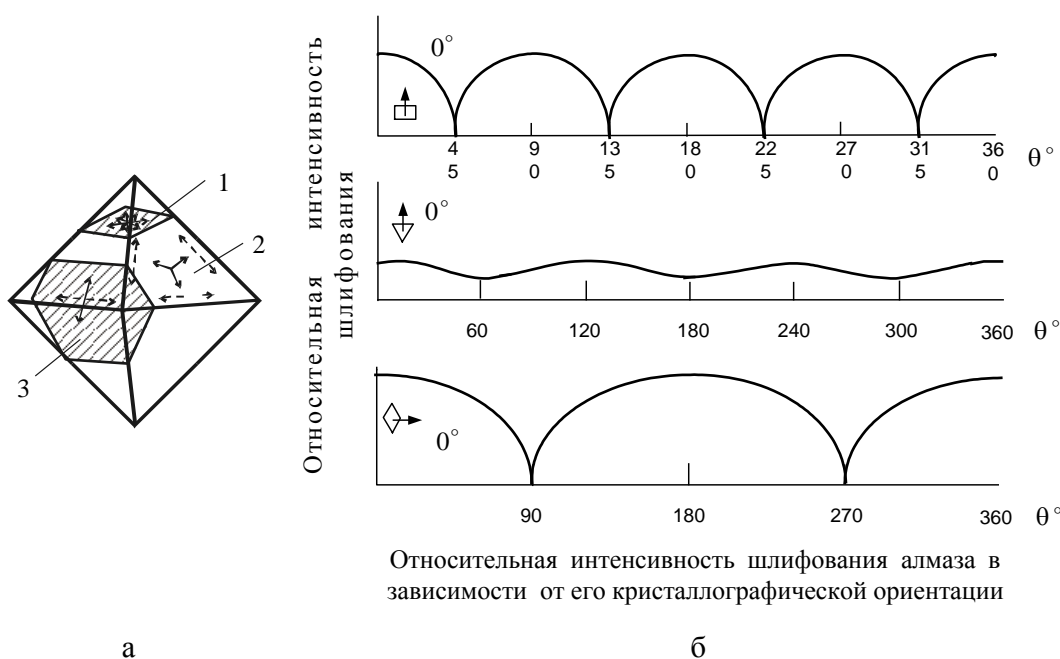


Рис. 6.7. Схема размещения плоских сеток в структуре алмазного зерна в форме октаэдра (а) и относительная величина интенсивности процесса шлифования в различных направлениях (б) [63, 156]:

1 – плоскость куба; 2 – плоскость октаэдра; 3 – плоскость ромбододекаэдра

Если принять равновероятное ориентирование алмазного зерна в форме октаэдра к зоне контакта вершиной, гранью или ребром (в соответствии с их количеством – 6 вершин и по 8 ребер и граней), а также равновероятное совпадение направления его перемещения относительно обрабатываемого материала

«мягким» или «твердым» направлением, то при шлифовании, когда направление движения зерен относительно кристаллитов СТМ неизменно, вероятность того, что зерно будет изнашиваться как «мягкая» грань, равно:  $\frac{1}{2}$  при контакте вершиной; ребром или гранью. Будем если считать, что вершиной будет ориентировано  $\frac{3}{11}n$  зерен, а ребрами и гранью по  $\frac{4}{11}n$ , и половина из них будет изнашиваться быстрее (где  $n$  – общее число зерен в контакте, 22 – общее число вершин, граней и ребер). При ориентации вершиной интенсивность износа  $K_{и} = 1.0$ ; гранью и ребром – по  $K_{и} = 0.1$ . Тогда, с учетом направлений, быстро изнасятся: при ориентации вершиной  $\frac{3}{22}n$  зерен с интенсивностью  $K_{и} = 0.6$ ; при ориентации гранью и ребром:  $\frac{2}{11}n$  зерен с  $K_{и} = 0.1$  – гранью и с  $K_{и} = 1.0$  – ребром.

Таким образом, с учетом того, что грань изнашивается в 10 раз медленнее, чем ребро, через несколько секунд шлифования в работе будут принимать участие только «твердые» грани, т. е.  $\frac{2}{11}n$  зерен в контакте, или около 20 % наиболее выступающих из связки зерен.

Это относится и к кристаллитам СТМ октаэдрической формы. Причем  $\frac{1}{11}n$  зерен (ориентированных ребром) будет изнашиваться с коэффициентом интенсивности  $K_{и} = 1$ ,  $\frac{3}{11}n$  (ориентированных вершиной) с  $K_{и} = 0.6$  и  $\frac{2}{11}n$  (ориентированных гранью) с  $K_{и} = 0.1$ .

Следовательно, процесс износа (микроразрушения) различно ориентированных зерен на поверхности РПК можно представить следующим образом. В первый момент (после вскрытия круга) в работе принимают участие  $\frac{3}{11}n$  зерен, ориентированных вершиной, и по  $\frac{4}{11}n$ , ориентированных гранью и ребром.

Наиболее интенсивно (в 10 раз быстрее, чем грань) изнашиваются зерна, контактирующие ребром, и в 1.6 раза – вершиной зерен. Следовательно, через определенный период времени всю нагрузку на себя «принимают» наименее изношенные зерна, контактирующие «твердой» гранью. Исходя из числа граней

«мягких» и «твердых» направлений износа можно принять, что для зерна в форме октаэдра вероятность интенсивного изнашивания имеют  $V = 2/11$  зерен. Из числа участвующих в работе зерен,  $1/3$  будет изнашиваться в 5 – 10 раз быстрее и через определенное время прекратит съём материала, а всю нагрузку примут на себя «твердые» грани зерен. При этом нагрузка на них увеличится соответственно в среднем тоже на 30 %.

Таким образом, при расчете реального числа работающих зерен и нагрузки на каждое из них следует учитывать факт различной интенсивности износа неодинаково ориентированных алмазных зерен. При производительном шлифовании СТМ нормальное давление (или  $S_{\text{поп}}$ ) следует назначать таким образом, чтобы при критической ситуации, когда будут работать только «твердые» грани, нагрузка на каждое должна быть достаточной для их усталостно-циклического разрушения-самозатачивания и исключения образования износостойкой пары трения «твердое» зерно – «твердый» кристаллит. По мере износа число «твердых» граней в контакте растёт, нагрузка на единичное зерно падает и процесс съема припуска практически прекращается. Такие зерна с площадками износа становятся сдерживающим фактором для процесса шлифования. Их надо либо разрушить, либо удалить с поверхности РПК. В разработанных ранее способах [36, 138] реализован второй вариант. Нами предложен (см. гл. 7) способ принудительного формирования на таких зернах режущего субмикрорельефа.

Разрушить такое алмазное зерно можно также, используя анизотропию свойств алмаза. Как установлено в [156], основным механизмом микроразрушения кристаллитов СТМ и алмазных зерен является либо скол по плоскости  $\{111\}$ , где поверхностная энергия наименьшая и равна всего  $10.6 \text{ Дж/м}^2$  [2], либо истирание «мягких» граней и направлений, интенсивность съема которых в 10 раз выше, чем «твердых». Известно, что алмаз легко раскалывается по определенным кристаллографическим плоскостям [165], параллельным именно октаэдрическим граням. Сколоть уплощенное зерно можно при условии оптимально выбранных режимов шлифования и характеристик кругов, увязав их с размерами кристаллитов СТМ, зернистостью круга и величиной собственных колебаний алмазных зерен в связке. При этом скол «неблагоприятного» алмазного зерна и кристаллита СТМ произойдет в том случае, когда сработает расчетная схема (рис. 6.8 а), т. е. алмазное зерно «успеет» отследить (попасть) в

**Примечание [V392]:** Стр: 236  
[a№3006] Грабченко А. И. Научные основы алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов: Диссертация в форме научного доклада докт. техн. наук: 05.03.01. - Харьков, 1995. - 59 с. {Book: Date 03/09/02 Time 22:48:06}

**Примечание [V393]:** Стр: 236  
[a№260] Пат. 677894 Швейцария, МКИ В 24 В 53/00; В 23 Н 5/08; В 24 D 3/34. / V.L. Dobroskok, V.F. Drozhin, A.I. Grabchenko, A.I. Mikhailov, D.E. Belyavsky, V.L. Rokhlin (Kharkov SU); Заявл. 27.09.88; Оpubл. 15.07.91. - 20 с. {Book: Date 03/09/02 Time 22:49:20}

**Примечание [V394]:** Стр: 236  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 03/09/02 Time 22:50:23}

**Примечание [V395]:** Стр: 236  
[a№3063] Алмаз : Справочник / Д.В. Федосеев, Н.В. Новиков, А.С. Вишневский и др. - Киев: Наук. думка, 1981. - 76 с. {Book: Date 03/09/02 Time 22:50:48}

**Примечание [V396]:** Стр: 236  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 03/09/02 Time 22:51:30}

выработанную «мягкую» грань кристаллита СТМ. Жесткость связки при отслеживании анизотропии свойств кристаллитов СТМ играет определяющую роль. Чем выше жесткость связки, тем больше вероятность «успевания» отследить анизотропию кристаллитов, тем производительнее процесс.

При этом интенсифицируется и процесс съема (микроразрушения) припуска СТМ, т. к. кристаллит (111) либо сколется по октаэдрической грани, либо будет удален полностью. Такая схема реализуется путем управления скоростью шлифования, упругими свойствами связки, зернистостью круга во взаимосвязи с размерами кристаллитов СТМ. Например, уменьшив скорость шлифования, можно реализовать производительный процесс обработки (см. рис. 6.8 а), а, увеличив скорость шлифования, интенсифицировать доводочный процесс (рис. 6.8 б).

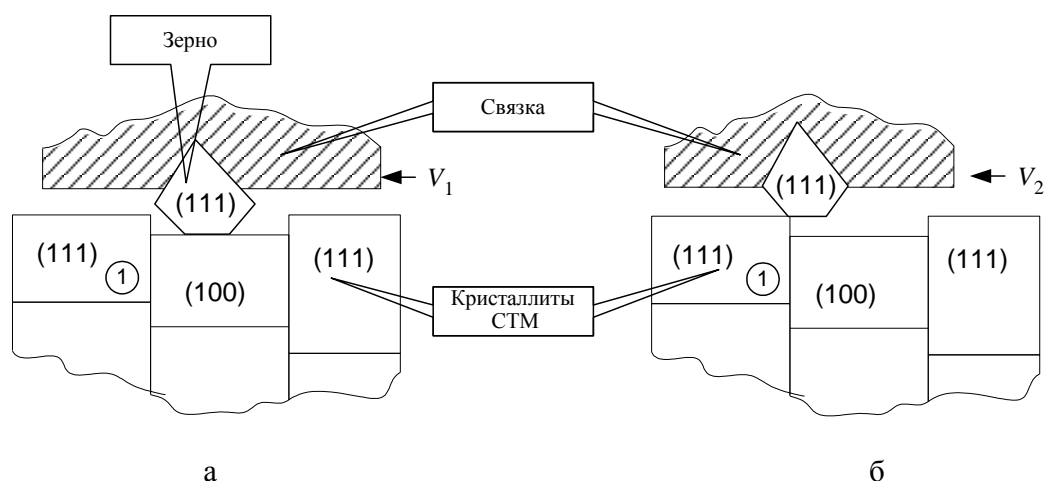


Рис. 6.8. Расчетные схемы взаимодействия элементов системы «кристаллиты СТМ – зерно – связка»: а – зерно успевает отслеживать «мягкую» грань; б – зерно не успевает отслеживать «мягкую» грань

Поскольку основную работу будут совершать «твердые» грани зерен, то и расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «СТМ–зерно–связка» следует проводить в зоне контакта именно таких зерен. Аналогичным образом будут изнашиваться по-разному ориентированные к зоне шлифования кристаллиты СТМ. Производительность шлифования и износ круга будут определять взаимное разрушение «твердых» кристаллитов и «твердых» алмазных зерен. Следовательно, важным параметром, определяющим НДС системы и,



как следствие, интенсивность взаимного микроразрушения ее элементов, будет являться величина фактической площади контакта «твердое зерно – твердый кристаллит» [43].

Таким образом, анизотропия свойств алмазных зерен и кристаллитов СТМ оказывают существенные влияния на механизм съема припуска (производительность шлифования и качество обработанной поверхности), а также на динамику изменения параметров РПК (число работающих зерен, контактирующих вершиною, гранью или ребром).

Полученные результаты использованы при 3D моделировании напряженного деформированного состояния системы «СТМ–зерно–связка».

### 6.6. Влияние топографии круга на 3D напряженно-деформированное состояние зоны шлифования

В гл. 4 показано, что в процессе традиционного алмазного шлифования СТМ кругами на металлической связке аномально интенсивно изменяются выходные показатели в соответствии с происходящими изменениями параметров режущего рельефа круга (РПК). Так, например, при шлифовании двухслойных алмазных пластин (ДАП) практически все острые зерна на РПК за 2 минуты работы трансформируются в зерна с площадками износа.

Изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) пространственной системы «СТМ–зерно–связка» при различных топографических параметрах взаимодействующих поверхностей необходимо для определения их влияния на количественные показатели процесса микроразрушения ее элементов в процессе шлифования. Такие расчеты осуществляются в разработанном теоретическом модуле экспертной системы процесса шлифования СТМ (см. гл. 8).

В качестве параметров топографии РПК, влияющих на 3D НДС системы «СТМ – зерно – связка», выбраны величина угла при вершине алмазного зерна  $\varphi$ ; число зерен в контакте с СТМ; рабочая высота выступания зерен из связки; площадки износа в контакте с СТМ. В пакете программ типа Cosmos выявлено влияние этих параметров на величину главных и приведенных напряжений, энергии и плотности энергии деформации в каждом элементе системы. Расчеты позволили определить объемы разрушенных СТМ и алмазных зерен, а также объемы выпавших из связки зерен по объему конечных элементов с критическими значениями напряжений и/или энергии (плотности энергии) деформации.

**Примечание [V397]:** Стр: 238  
[a№3044] Грабченко А.И., Федорович В.А. Влияние анизотропии свойств кристаллитов на процесс взаимного разрушения элементов системы "СТПМ-зерно" при шлифовании // Мат. межд. научн.-техн. конф. "Сверхтвердые инструментальные материалы на рубеже тысячелетий: получение, свойства, применение" (СТИМ-2001). - Киев: ИСМ НАН Украины. - 2001. - С. 160-163.  
{Book: Date 03/09/02 Time 22:52:25}

Результаты этих расчетов использованы в теоретическом модуле экспертной системы для определения производительности шлифования и удельного расхода зерен.

Расчеты влияния остроты алмазных зерен (угол при вершине зерна  $\phi$ ) на величину приведенных напряжений и энергии деформации в элементах системы «СТМ – зерно – связка» показали, что этот параметр является определяющим для взаимного микроразрушения как СТМ, так и алмазных зерен (рис. 6.9, 6.10). Так, увеличение угла  $\phi$  с  $30^\circ$  до  $120^\circ$  уменьшает величину приведенных напряжений в контакте «зерно – СТМ» более чем в 3 раза, что уменьшает объем разрушенного СТМ с 0.256 до 0.07, а алмазных зерен – с 0.317 до  $0.09 \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^3$  (табл. 6.6). Основным фактором, снижающим эффективность производственного процесса шлифования СТМ, является образование на алмазных зернах площадок износа. Наличие в контакте с СТМ зерен с площадками износа на порядок уменьшает величину приведенных напряжений в контакте «зерно – СТМ» (рис. 6.11). Влияние числа зерен в контакте с СТМ и их рабочей высоты на НДС системы «СТМ – зерно – связка» приведено на рис. 6.12, 6.13.

Таблица 6.6. – Результаты расчетов объемов разрушенных СТМ ( $V_{\text{СТМ}}$ ) и алмазных зерен ( $V_z$ )

Разрушенные объемы, $\text{мм}^3$	Модуль упругости связки $E$ , МПа			
	50	100	150	200
$V_z$	0.248	0.356	0.483	0.564
$V_{\text{СТМ}}$	0.117	0.183	0.214	0.283
Разрушенные объемы, $\text{мм}^3$	Угол при вершине зерна $\phi$			
	$30^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$
$V_z$	0.317	0.265	0.113	0.09
$V_{\text{СТМ}}$	0.256	0.183	0.11	0.07

Примечание. Общие условия: обрабатываемый материал – АСПК; марка зерна – АСб; концентрация зерен – 100% (4); относительная величина критической заделки зерен  $\epsilon_{\text{кр}} = 0.5$ ; нормальное давление  $P_n = 2.0 \text{ МПа}$ .

Влияние указанных параметров на НДС системы объясняется перераспределением подводимой в зону шлифования энергии между элементами системы «СТМ–зерно–связка». Более острые зерна позволяют больше энергии сконцентрировать в зоне их контакта с СТМ, что способствует интенсификации микроразрушения.

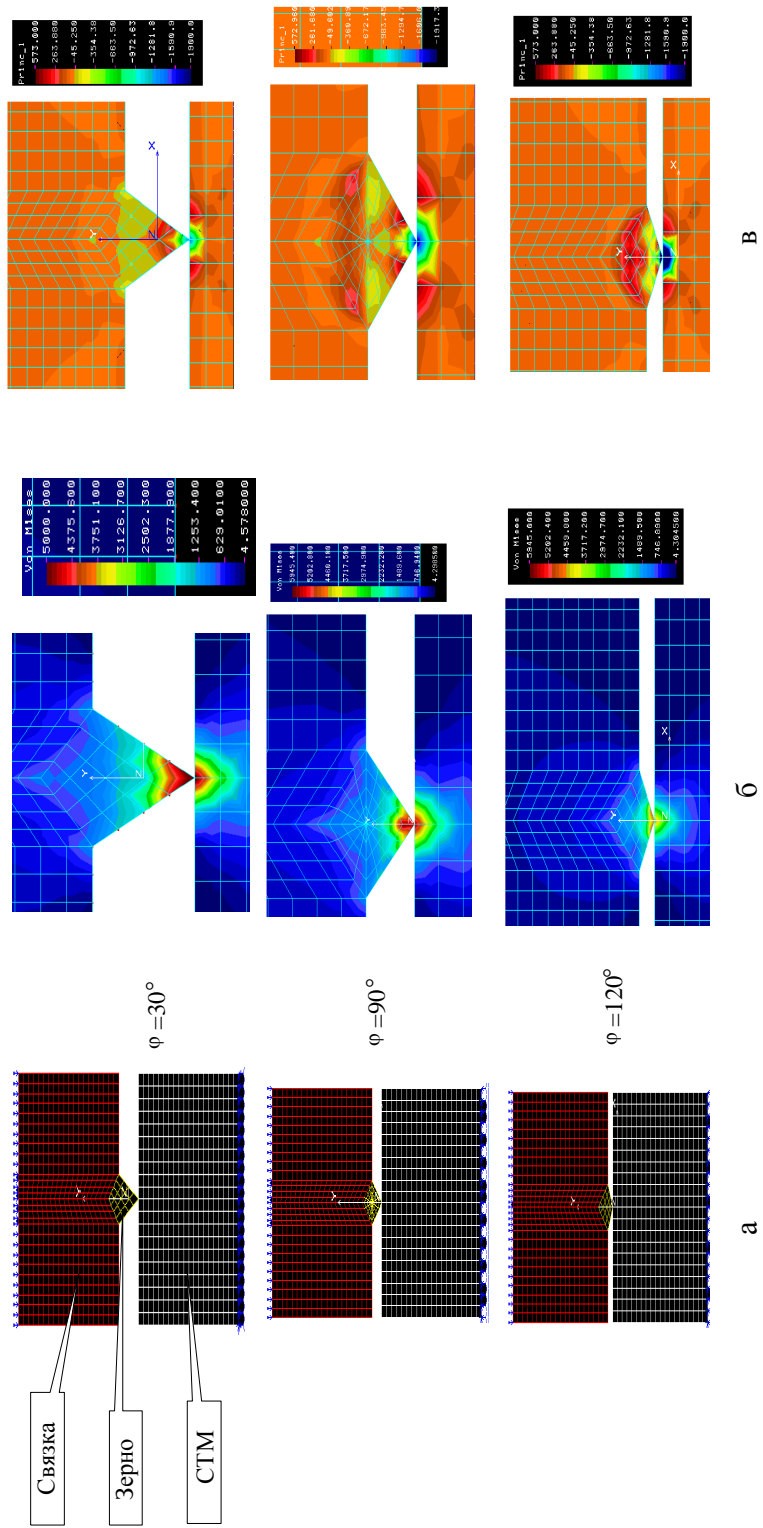
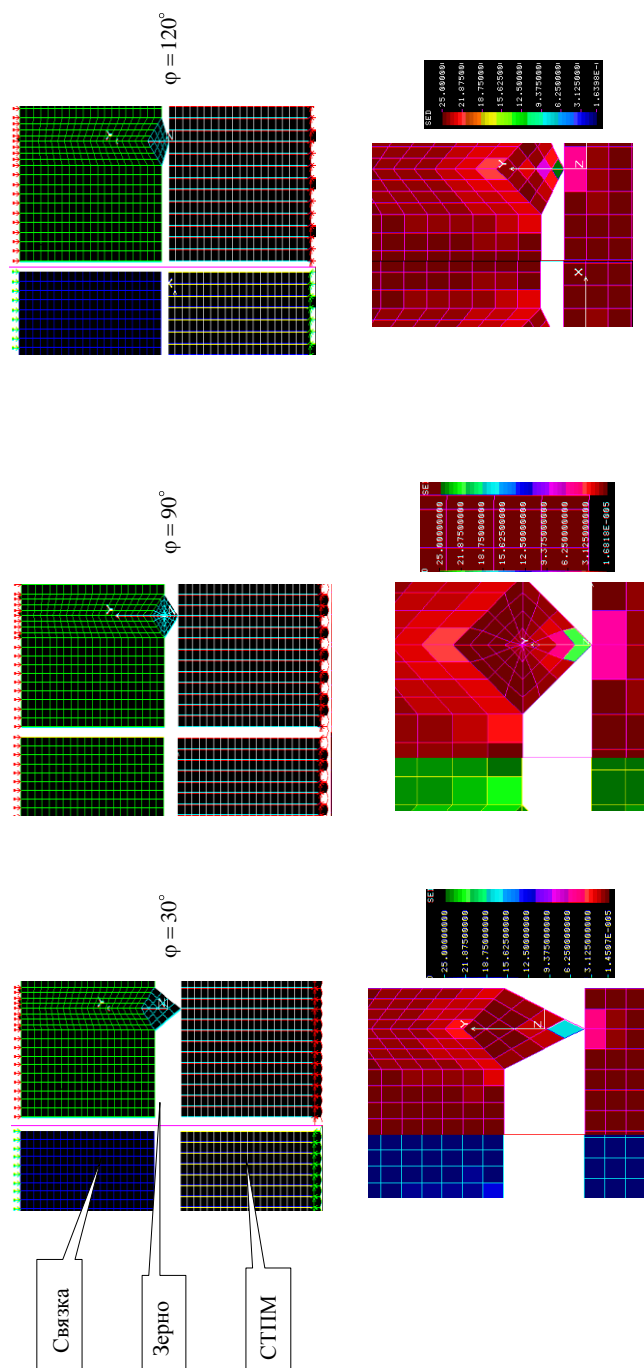


Рис. 6.9 Влияние угла при вершине зерна на 3D НДС системы «СТМ – зерно – связка»:  
а – расчетные схемы; б – приведенные напряжения; в – главные напряжения.  
Условие разрушения:  $\sigma_{\text{пр}} \geq [\sigma_{\text{р}}]$ ;  $[\sigma_{\text{р}}] = 750 \text{ МПа}$ ;  $[\sigma_{\text{р}}]$  – предел прочности при растяжении;  $\sigma_{\text{пр}}$  – приведенные напряжения.  
Результаты расчетов:  $V_{\text{СТМ}} = K E_{\text{СТМ}} \mu_{\text{СТМ}} E_3 \mu_3 E_{\text{св}3} (S_{\text{ноп}}) \varphi^{-0.26}$  мкм;  
 $V_{\text{СТМ}} = 0.15 \varphi^{-0.26}$  мкм;  $V_3 = 0.27 \varphi^{-0.27}$  мкм;  $\Delta h_{\text{СТМ}} = 0.02 \varphi^{-0.23}$  мкм;  $\Delta h_3 = 0.03 \varphi^{-0.13}$  мкм,



φ, град	$E_{CTM}, 10^{-4}$ Дж	$E_s, 10^{-4}$ Дж	$E_{CB}, 10^{-4}$ Дж	$\Delta t_{CTM}, 10^{-1}$ мкс	$\Delta t_s, 10^{-1}$ мкс	$\Delta V_{CTM}, 10^{-9}$ мкВ	$\Delta V_s, 10^{-9}$ мкВ
30	7.32	17.37	4.23	13.0	110.4	7.34	8.24
90	16.28	21.26	6.45	2.10	66.4	1.55	1.64
120	12.3	25.19	8.45	0.21	12.6	0.13	0.46

Рис. 6.10. Влияние зерна на энергию деформации в системе: а – расчетные схемы; б – энергия деформации.  $E$  – энергия деформации в СТМ и связке;  $\Delta V$  – объемы разрушенного СТМ и зерна;  $\Delta h$  – линейный износ СТМ и зерен

Рабочая высота зерен в большой степени влияет на критическую величину их заделки в связку. Проведенные расчеты позволили получить зависимости влияния рабочей высоты зерен, модуля упругости металлической связки, нормального давления  $P_n$  (для упругой схемы шлифования) и величины поперечной подачи  $S_{\text{поп}}$  (для «жесткой» схемы шлифования) на критическую величину заделки зерен в связку (см. рис. 6.13). Эти результаты использованы в теоретическом модуле экспертной системы процесса алмазного шлифования для определения критической величины заделки алмазных зерен (см. гл. 8).

Анализ полученных зависимостей показал, что даже незначительное число зерен с площадками износа «забирает» на себя большую часть нагрузки и не дает острым зернам производить эффективную работу микроразрушения СТМ, т. к. напряжения в контакте не достигают предела его прочности (см. рис. 6.11).

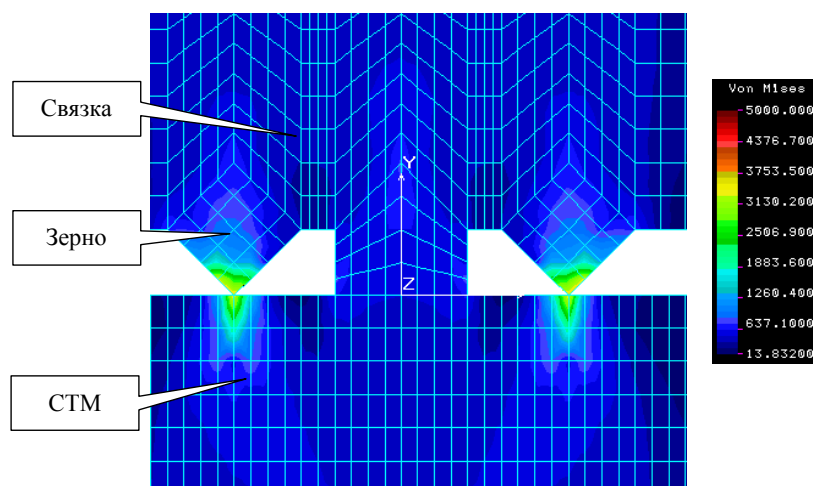


Рис. 6.11. Приведенные напряжения в системе «РПК-СТМ»

Зерна с площадками износа не могут быть разрушены только за счет увеличения нагрузки  $P_n$ , так как, например, при прочности зерен 32 Н уже даже при 100 зернах в контакте с СТМ общая нагрузка на него будет 3200 Н, что приведет к растрескиванию обрабатываемой поверхности СТМ (брак при заточке лезвийного инструмента из СТМ). Следовательно, такие зерна необходимо либо «убирать» с рабочей поверхности круга (удалением связки), либо микроразрушать вершины зерен для образования острых субмикроромок, например, ультразвуковым способом (см. гл. 7).

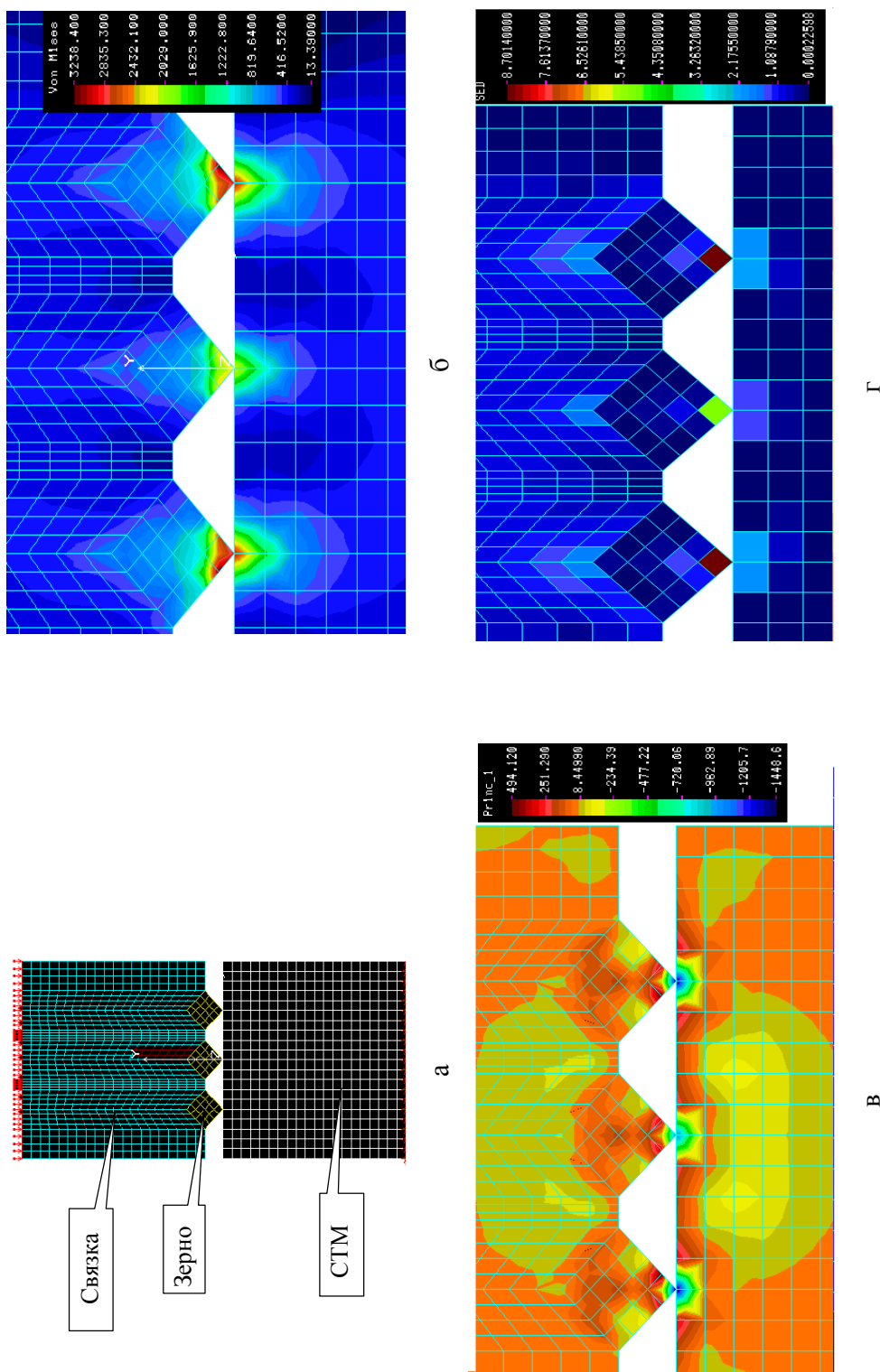


Рис. 6.12. Влияние числа зерен в контакте с СТМ на параметры НДС системы «СТМ – зерно – связка»:  
а – расчетная схема; б – приведенное напряжение; в – главные напряжения; г – плотность энергии деформации

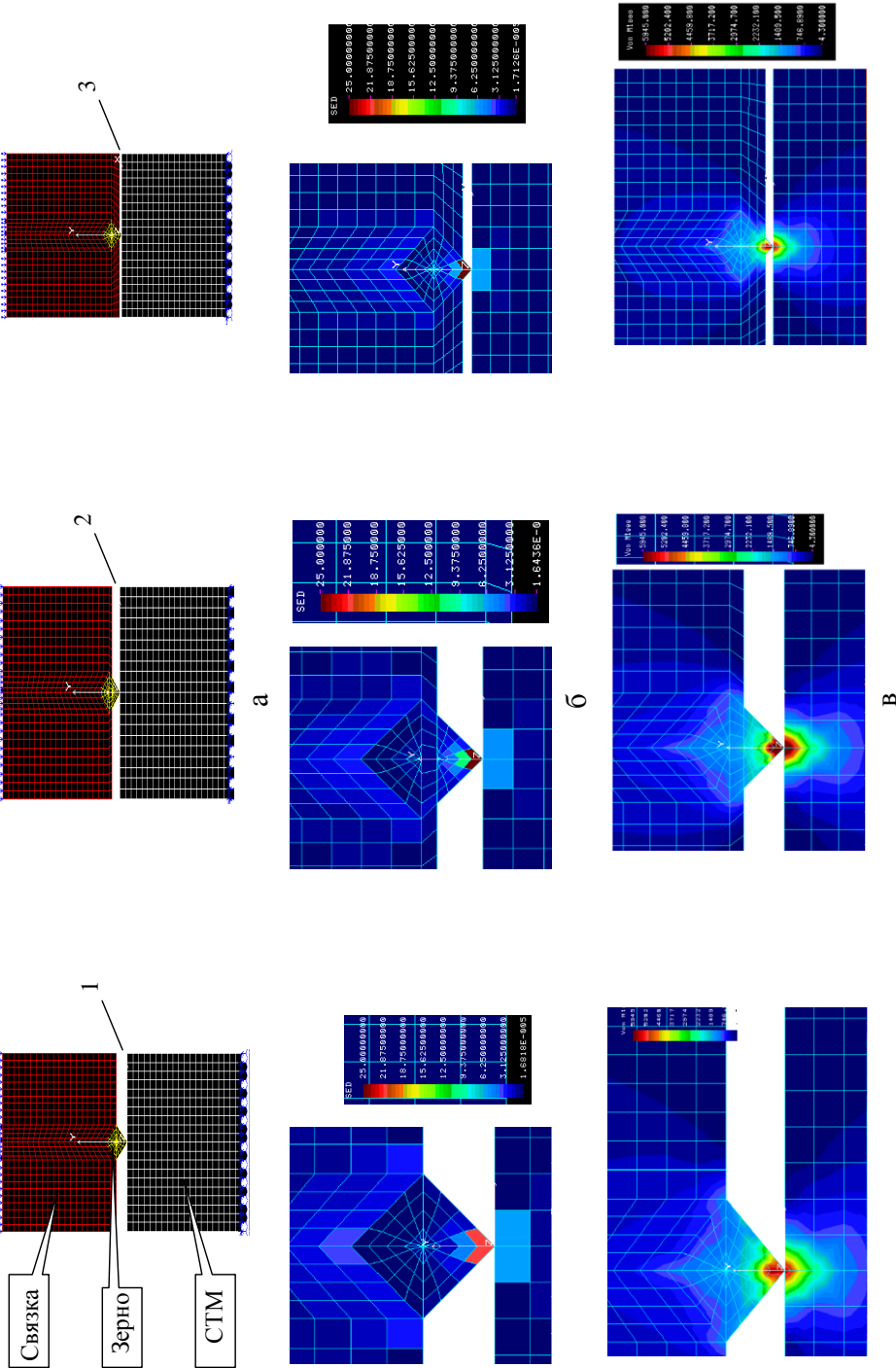


Рис. 6.13. Влияние рабочей высоты зерен на параметры НДС системы «СТМ – зерно – связка»:  
а – расчетные схемы взаимодействия элементов системы «СТМ – зерно – связка»; б – энергия деформации;  
в – приведенные напряжения.

$1 - h_p = l_3/2; 2 - h_p = l_3/3; 3 - h_p = l_3/4$

С уменьшением числа зерен в контакте, например, за счет концентрации алмазов в круге или увеличения рабочей высоты зерен  $h_p$ , увеличивается нагрузка на единичное алмазное зерно, уменьшается вероятность контактирования их с СТМ площадками износа, и можно существенно интенсифицировать процесс микроразрушения припуска под обработку СТМ. Критическая величина заделки зерна в связку, определяемая величиной максимальных приведенных напряжений в ней, также зависит от соотношения в контакте зерен с площадками износа и острых. Так, расчеты показали, что увеличение зерен с площадками износа с 10 % до 80 % приводит к уменьшению критической величины заделки  $h_{кр}$  от 45 до 25 мкм.

Исследование влияния параметров топографии РПК на 3D НДС системы показали, что если алмазное зерно даже не значительно выступает из связки ( $h_p \neq 0$ ), т. е. связка не контактирует с обрабатываемым материалом, в нем возникают напряжения, достаточные для процесса самозатачивания (микроразрушения). Если зерно полностью заделано в связку ( $h_p = 0$ ), за счет объемного «обжатия» связки и отсутствия свободных границ оно не самозатачивается. В связи с этим производительный процесс шлифования СТМ следует осуществлять только при реализации первого типа взаимодействия в системе «РПК–СТМ» т.е. без контакта связки с обрабатываемым материалом.

## Выводы

1. Проведен комплексный теоретико-экспериментальный анализ трехмерного процесса топографической приспособляемости, основанный на теоретическом описании параметров топографии рабочей поверхности круга, их изменения в процессе его износа и экспериментальном лазерном сканировании поверхности РПК и СТМ. Полученные теоретические зависимости позволяют определять число зерен на РПК и в контакте с СТМ, относительной опорной площади поверхности и длины профиля РПК, величины фактической площади контакта РПК с СТМ, а также динамику их изменения по мере износа круга и изменения критической величины заделки зерна в связку. Появилась возможность теоретически оценивать изменение параметров топографии РПК в про-



цессе шлифования. Полученные зависимости использованы при разработке теоретического модуля экспертной системы процесса шлифования СТМ

Разработана методика определения фактической площади контакта РПК с СТМ и ее изменения в процессе приспособляемости, основанная на искусственной замене дискретной поверхности РПК – непрерывной и учитывающая упругое заглубление алмазных зерен в связку. Предложен двухэтапный метод 3D экспериментально – теоретического определения фактической площади контакта РПК с СТМ в условиях отсутствия внедрения зерен в обрабатываемый материал и отсутствия контакта его со связкой, учитывающий субмикрорельеф алмазных зерен и СТМ, анизотропию свойств кристаллитов СТМ и алмазных зерен, упругие свойства связки круга. На первом этапе рассчитывается фактическая площадь контакта «РПК–СТМ» на макроуровне через относительную опорную площадь поверхности круга, а затем, приняв ее за контурную, применяя модернизированную методику расчета параметров дискретной относительной опорной поверхности РПК ( $b$  и  $\gamma$ ), проводится расчет фактической площади контакта на микроуровне «СТМ – микрорельеф зерен» по известным зависимостям Демкина Н. Б. и Крагельского И. В. При этом в качестве характеристики жесткости системы используется модуль упругости металлической связки, а не контактирующих материалов.

Экспериментальное определение величины фактической площади контакта в системе РПК – СТМ можно выполнять по результатам лазерного сканирования их поверхностей и компьютерного определения величины относительной опорной площади.

Получены теоретические зависимости, описывающие взаимосвязь и изменение таких параметров, как рабочая высота зерен, число зерен на РПК и в контакте, их концентрация в круге, относительная опорная длина и площадь профиля РПК, фактическая площадь контакта, удельная нагрузка в процессе износа алмазного круга. Теоретически обосновано и экспериментально доказано положение о том, что концентрация алмазов в круге, рабочая высота зерен и критическая глубина их заделки в связку являются важнейшими факторами процесса алмазного шлифования СТМ. Уменьшение концентрации алмазов в круге до уровня 5 – 20 % с соответствующим уменьшением рабочей высоты зерен до уровня микронеровностей связки и увеличение модуля ее упругости не приводит к ухудшению выходных показателей алмазного шлифования СТМ, т. е. величина фактической площади контакта РПК с СТМ остается неизменной,

но существенно снижает удельный расход и себестоимость обработки, повышает степень использования алмазных зерен.

Анизотропия физико-механических свойств алмазных зерен, обуславливающая существенно различную (до 10 раз) интенсивность износа их различных граней, должна учитываться при анализе изменения параметров рабочей поверхности круга в процессе его износа, например, при расчете числа фактически работающих зерен, величины фактической площади контакта в системе «РПК – СТМ» и т. д. Это положение подтверждается существенным (до 3 раз) расхождением результатов расчета и экспериментального определения числа зерен в контакте РПК с СТМ.



## Глава 7

### **Разработка методологии управления процессом приспособляемости и способов ее реализации**

В главе излагается разработанная методология комплексного управления процессом приспособляемости и способов ее реализации. Процесс управления приспособляемостью основан на принудительном регулировании величины фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ» путем одновременного дозируемого удаления связки (макроуровень) и принудительного формирования субмикрорельефа на алмазных зернах введением в зону шлифования и/или управления энергии ультразвуковых колебаний (микроуровень).

#### **7.1. Разработка методологии управления топографической, структурно-фазовой и энергетической приспособляемостью**

Основным условием высокой эффективности алмазного шлифования СТМ является сохранение в процессе всего периода обработки такого состояния рабочей поверхности кругов, когда совокупность ее режущих алмазных элементов способна передавать прилагаемую нагрузку на бесконечно малые участки обрабатываемой поверхности, обуславливая в окрестностях пятна упругого контакта локальные напряжения, превышающие значения критических для данного сверхтвердого материала, благодаря чему доля энергии, идущей на разрушение, в общих затратах возрастает, обобщенным результатом чего является интенсивный съем СТМ.

Высокоэффективные процессы алмазного шлифования СТМ необходимо базировать на принципе непрерывного формирования энергетически неустойчивого состояния с целью предотвращения структурно-топографической приспособляемости взаимодействующих поверхностей при обеспечении статически неизменных оптимальных параметров режущего рельефа круга в течение всего периода шлифования [33]. Это означает, что устойчивость выходных показателей высокопроизводительной обработки СТМ обеспечивается не-

**Примечание [V398]:** [a№284] Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. - Харьков: Вища шк., 1985. - 184 с. {Book: Date 31/08/02 Time 13:53:30}

устойчивой рабочей поверхностью круга, т. е. алмазные зерна могут эффективно шлифовать СТМ только тогда, когда сами будут разрушаться с оптимальной интенсивностью, сохраняя необходимую развитость субмикрорельефа [165]. Стабилизация же выходных показателей процесса достигается тем, что, оказывая специальное дозирующее воздействие на рабочую поверхность круга и на алмазные зерна, обеспечивается соответствие темпа восстановления ее параметров темпу изменения в зоне шлифования в зависимости от требований обработки СТМ. Нужно непрерывно сообщать рабочей поверхности круга и обрабатываемой поверхности СТМ дополнительную энергию, которая обеспечила бы увеличение полезной энергии разрушения  $E_p$  в общем объеме затрат, сделав структуру поверхности энергетически неустойчивой, и обеспечила бы в результате предотвращение структурно-топографической приспособляемости. Поскольку показатели шлифования наиболее тесно связаны с относительной величиной фактической площади контакта «РПК – СТМ», следует оптимизировать величину дополнительной энергии, сообщаемой взаимодействующим поверхностям с целью исключения неоправданно большого расхода алмазов и возможности эффективного использования всего диапазона приспособляемости.

Таким образом, в отличие от положения Б. И. Костецкого [72] об инверсии финишной абразивной обработки в основном за счет воздействия на обрабатываемый материал, нами в качестве определяющего объекта управления выбрана и рабочая поверхность круга, и обрабатываемый материал. Управление процессом приспособляемости за счет воздействия на обрабатываемую поверхность СТМ осуществляется путем изменения условий динамического воздействия энергией ультразвука и использования влияния анизотропии свойств кристаллитов СТМ на изменение характера взаимодействия элементов системы «РПК-СТМ».

Попытка интенсифицировать процесс за счет увеличения давления в контакте «СТМ-РПК» (например, увеличением поперечной подачи) в большинстве случаев приводит к браку из-за появления сетки микротрещин на обработанной поверхности СТМ. Разработанные ранее способы шлифования с управлением режущим рельефом кругов устраняли этот недостаток в основном за счет управляемого дозируемого удаления связки круга (например, электрохимическим способом) и, тем самым, принудительно удаляли «тормозящие» процесс алмазные зерна с площадками износа с поверхности РПК [148]. Такой процесс,

**Примечание [V399]:** [a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 23/08/02 Time 15:20:02}

**Примечание [V400]:** [a№3037] Костецкий Б.И., Шульман А.П., Ляшко В.А., Носовский И.Г. Инверсия структурной приспособляемости в процессах финишной алмазной обработки // Синтетические алмазы - ключ к техническому прогрессу. - Киев. - 1977. Ч.1, - С. 273-279. {Book: Date 31/08/02 Time 13:54:22}

**Примечание [V401]:** Стр: 249 [a№518] Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении: Уч. пособие / Под. ред. А.И. Грабченко. - Харьков: ХГПУ, 1999. - 436 с. {Book: Date 31/08/02 Time 22:39:48}

безусловно, эффективен, однако он характеризуется повышенным расходом алмазных зерен и, как следствие, низким коэффициентом использования их потенциально высоких режущих свойств. Известные способы формирования субмикрорельефа на алмазных зернах путем подачи в зону шлифования свободного абразива связаны с большой сложностью их практического применения и дополнительным расходом дорогостоящего алмазного порошка [45].

Перспективным представляется использование опыта ультразвуковой обработки хрупких неметаллических материалов [82, 103, 104]. Как известно, ультразвук в последние годы нашел широкое применение в промышленности при обработке ряда твердых и хрупких материалов. Проведены были также опыты по резке кристаллов алмаза с применением ультразвука [104], закончившиеся положительным результатом.

Ультразвуковая обработка хрупких материалов состоит из двух основных процессов: процесса ударного, упругого заглубления абразивных зерен, вызывающего выкалывание частиц обрабатываемого материала и процесса циркуляции абразива в рабочей зоне, в результате которого происходит унос выколотых частиц обрабатываемого материала и доставка свежего абразива.

Применение дополнительной энергии в виде ультразвуковых колебаний, вводимых в зону шлифования и/или в зону управления, позволит реализовать принцип инверсии приспособляемости за счет изменения динамических условий нагружения системы. При этом могут быть использованы особенности кристаллического строения составляющих СТМ и алмазных зерен, а также анизотропия их физико-механических свойств.

Нами предложен способ повышения режущей способности алмазных кругов за счет непрерывного управляемого формирования на площадках износа алмазных зерен режущего субмикрорельефа путем введения в зону шлифования и/или в зону управления энергии ультразвуковых колебаний [188]. В основу данного способа положен процесс ультразвукового шлифования и ультразвуковой правки кругов [91].

Основным назначением энергии ультразвуковых колебаний, вводимой в зону шлифования и/или управления, является принудительное формирование субмикрорельефа алмазных зерен. Именно при принудительном микроразрушении зерен генерируются новые острые режущие микрокромки, которые обеспечивают интенсивность удаления объемов материала припуска. Появле-

**Примечание [V402]:** [a№3000] Гусева Л.Ю. Автоматизация создания режущего микропрофиля на вершинах зерен крупнозернистых алмазных кругов // Российский научно-технический журнал "Инструмент и технологии" 2000. вып.1, с20-21. {Book: Date 29/01/02 Time 22:50:01}

**Примечание [V403]:** [a№3251] Марков А.И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов. - М.: Машиностроение, 1968. - 367 с. {Book: Date 24/08/02 Time 11:55:22}

**Примечание [V404]:** [a№3245] Кисилев М.Г., Миниченя В.Т. Применение ультразвука для формирования алмазного слоя на рабочей поверхности ограниченных дисков // Инструментальный світ.-2002.-№ 1(13).-С.30-31. {Book: Date 24/08/02 Time 11:55:54}

**Примечание [V405]:** [a№41] Марков И.А. Ультразвуковая обработка материалов. - М.: Машиностроение, 1980. - 237 с. {Book: Date 24/08/02 Time 11:56:41}

**Примечание [V406]:** [a№3032] Федорович В.А. Способы шлифования с комбинированным управлением режущим рельефом кругов. Вестник ХГПУ, Харьков. вып.45, с.26-28. {Book: Date 29/01/02 Time 22:53:19}

**Примечание [V407]:** [a№231] Кулабэ Д. Вибрационное резание: Пер. с яп. С.Л. Масленникова / Под ред. И.И. Портнова, В.В. Белова. - М.: Машиностроение, 1985. - 424 с. {Book: Date 29/01/02 Time 22:54:49}

ние уплощения вершин с началом приспособляемости снижает и впоследствии полностью исключает ощутимый съём объемов поликристалла.

Методология управления режущими свойствами кругов в процессе шлифования СТМ должна базироваться на формировании и поддержании в течение всего периода обработки энергетически неустойчивых состояний зерен и их структуры путем дозированного воздействия, направленного на предотвращение топографической и структурной приспособляемости рабочей поверхности алмазных кругов. Достичь этого выбором характеристики кругов и режимов шлифования невозможно.

В предложенных и разработанных способах реализуется комбинация двух методов: удаление связки – формообразование на макроуровне; принудительное формирование субмикрорельефа на алмазных зернах – формообразование на микроуровне.

Принципиальная схема предложенной методологии управления приспособляемостью приведена на рис. 7.1. Она включает способы, обладающие различными возможностями – от очень ограниченных (режимы шлифования, характеристика круга) до весьма широких, совпадающих по внешним признакам с возможностями методов правки кругов. Очевидно, для их оценки целесообразно вернуться к взаимосвязи параметров режущего рельефа кругов и выходных показателей процесса шлифования.

В гл. 4 было показано, что выходные показатели наиболее тесно связаны с относительной величиной фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ». Это положение принято в качестве исходного при анализе способов и средств предотвращения структурно-топографической приспособляемости. На этом основании предпочтительными следует считать такие способы сообщения дополнительной энергии, которые позволяли бы управлять фактической площадью контакта в системе «РПК–СТМ».

Способы, которые обеспечат лишь непрерывное микроразрушение зерен, не позволяют оптимизировать их высоту и исчерпают свои возможности, как только значение высоты выступления верен  $h_p$  станет соизмеримым с шероховатостью поверхности связки. С другой стороны, способы одновременного разрушения зерен в связке (например, используемые при правке кругов алмазными карандашами, режимы самозатачивания кругов) также не обеспечивают оптимизации  $A_r$ .

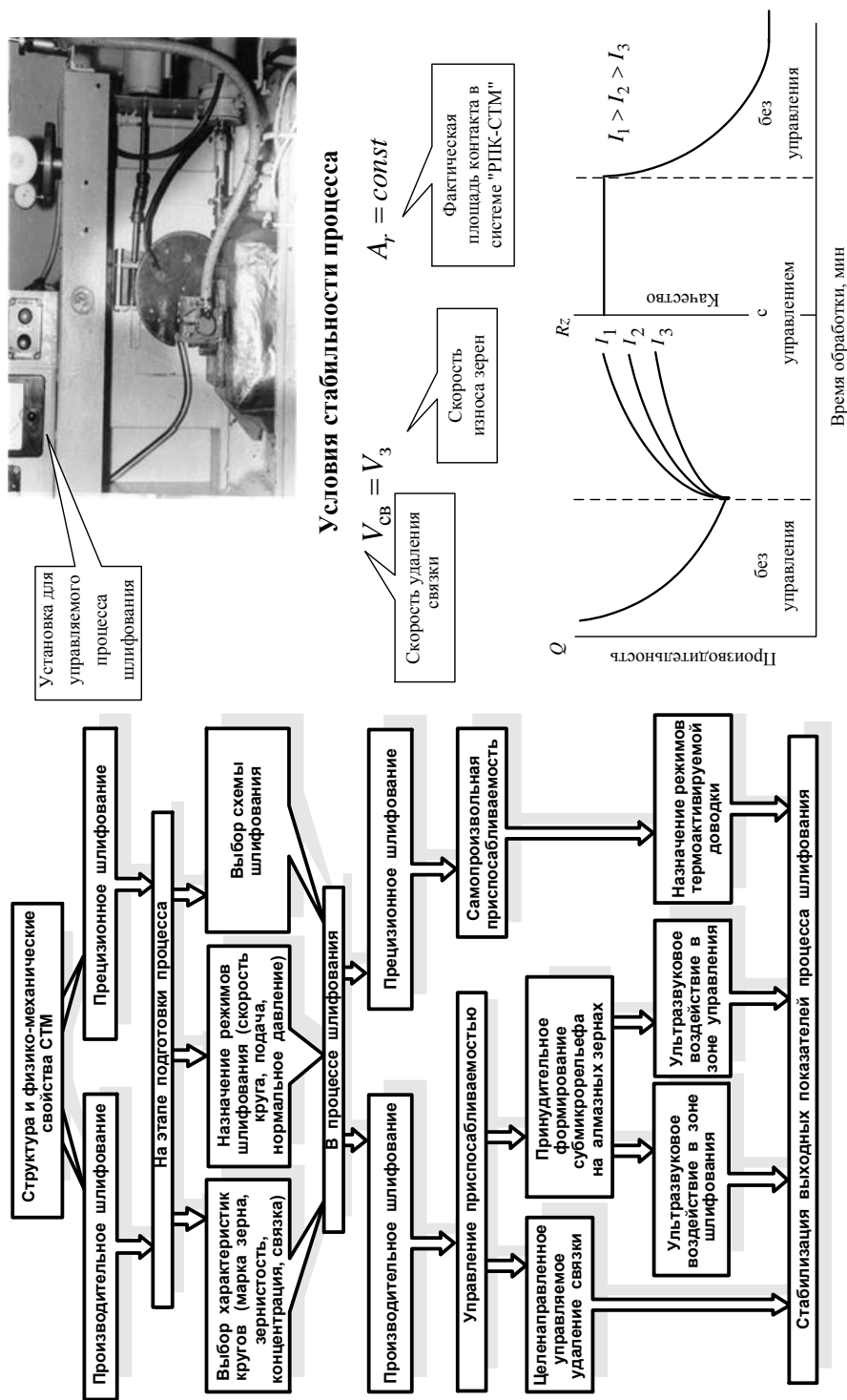


Рис. 7.1. Управление приспособляемостью при алмазном шлифовании СТМ:  
 $I$  – интенсивность управляющего воздействия



Отсюда следует вывод о целесообразности использования комбинации этих двух способов предотвращения приспособляемости рабочей поверхности кругов, которые основаны на избирательном воздействии на связку круга с целью управления высотой выступания зерен и принудительного формирования на них режущего субмикрорельефа. Причем, управление процессом приспособляемости осуществляем как на этапе подготовки процесса (выбор характеристик кругов, режимов шлифования и т. д.), так и в процессе шлифования. Определяющим аспектом управления приспособляемостью в процессе обработки в нашем случае является принудительное формирование субмикрорельефа алмазных зерен в зоне шлифования и/или в зоне управления, так как именно субмикрорельеф зерен обеспечивают требуемую эффективность производственного процесса шлифования. При прецизионном (доводочном) процессе дополнительного воздействия на РПК не требуется, т. к. в этом случае ответственными за микросъем являются термоактивируемые процессы.

## 7.2. Принудительное формирование режущего субмикрорельефа алмазных зерен

Поскольку главной причиной потери режущих свойств алмазными кругами при шлифовании СТМ является массовое образование на зернах площадок износа [165], основным способом повышения эффективности процесса является формирование на зернах режущего субмикрорельефа. Сформировать его можно или в зоне шлифования в процессе взаимодействия алмазных зерен с обрабатываемым СТМ, или/и в автономной зоне управления посредством воздействия на площадки износа инструментом-ударником с прочными и мелкими алмазными зернами в режиме ультразвуковых колебаний, а также другими способами. Наиболее эффективным представляется способ ультразвукового шлифования, но только не с продольными колебаниями, как это принято для улучшения качества обработки [104], а с поперечными, создающими дополнительные ударные нагрузки в контакте «зерно – СТМ», что с одной стороны интенсифицирует процесс съема припуска, а с другой обеспечивает процесс формирования на поверхностях износа зерен режущего субмикрорельефа. Такой способ эффективен только в тех случаях, когда дополнительная энергия ультразвука, вводимая в зону шлифования, не будет приводить к образованию дефектного слоя в процессе ультразвукового шлифования. Этот способ не применим при шлифовании СТМ с чрезмерно напряженной исходной структурой после синтеза и большим содержанием внутренних дефектов. Для таких материалов целесообразно при-

**Примечание [V408]:** Стр: 252 [a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 01/09/02 Time 22:29:03}

**Примечание [V409]:** [a№41] Марков И.А. Ультразвуковая обработка материалов. - М.: Машиностроение, 1980. - 237 с. {Book: Date 31/08/02 Time 13:56:28}

менение способа автономного (вне зоны шлифования) формирования на зернах режущего субмикрорельефа путем воздействия на них алмазными инденторами с ультразвуковой частотой колебаний. Для повышения эффективности процесса шлифования некоторых марок СТМ возможно применение комбинации этих двух способов, т. е. введение энергии ультразвука и в зону шлифования и в зону управления. Схема практической реализации способов шлифования с комбинированным управлением параметрами РПК представлена на рис. 7.2.

Теоретическое обоснование возможности и эффективности процесса ультразвукового формирования «режущего» субмикрорельефа на площадках износа алмазных зерен проведено нами в п. 5.6.

Экспериментальное исследование процесса формирования на поверхности СТМ (имитация площадки износа алмазного зерна) субмикрорельефа путем ультразвукового воздействия проводили на специальной установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 7.3 а.

Теоретически и экспериментально исследовалось влияние длины начальной микротрещины, марки обрабатываемого СТМ и марки алмазного зерна на число циклов до разрушения (образования лунки) поверхности алмазного зерна.

Средняя величина длины начальной микротрещины  $l_0$  определялась цветометрическим методом с компьютерной обработкой фотографий поверхности зерен (см. п. 2.8) и методом стереометрии [158]. Результаты экспериментального определения числа циклов нагружения до микроразрушения площадок износа различных марок алмазных зерен приведены на рис. 7.3.

Анализ результатов позволяет сделать вывод о существенном влиянии пористости (длины начальной трещины  $l_0$ ) на число разрушающих циклов нагружения  $N$ . Так, увеличение длины начальной микротрещины в 20 раз уменьшает число циклов до разрушения почти в 45 раз. Число циклов нагружения для разрушения различных марок СТМ отличается не более чем в 1.5 раза, что объясняется близкими значениями коэффициентов трещиностойкости для этих материалов. Влияние марки зерна-ударника сказывается, очевидно, в основном через геометрические параметры зерен различным марок, т. е. радиус округления их вершин. Существенное влияние на интенсивность взаимного микроразрушения алмазных зерен круга и инструмента – ударника оказывают модули упругости как связки круга, так и инструмента-ударника. Как было показано в гл. 5, величина модуля упругости связок круга и инструмента-ударника определяет величину напряжений и энергии деформации в контакте «зерно ударника – зерно круга». Кроме этого от величины модуля упругости связки зависит частота собственных колебаний алмазных зерен в круге, которая

**Примечание [V410]:** [a№3036]  
Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. М. "Металлургия" 1976.  
271 с. {Book: Date 29/01/02 Time 23:16:55}

определяет возможность или не возможность отслеживания алмазным зерном анизотропии свойств кристаллитов СТМ. Роль частоты собственных или вынужденных колебаний алмазных зерен будет показана ниже.

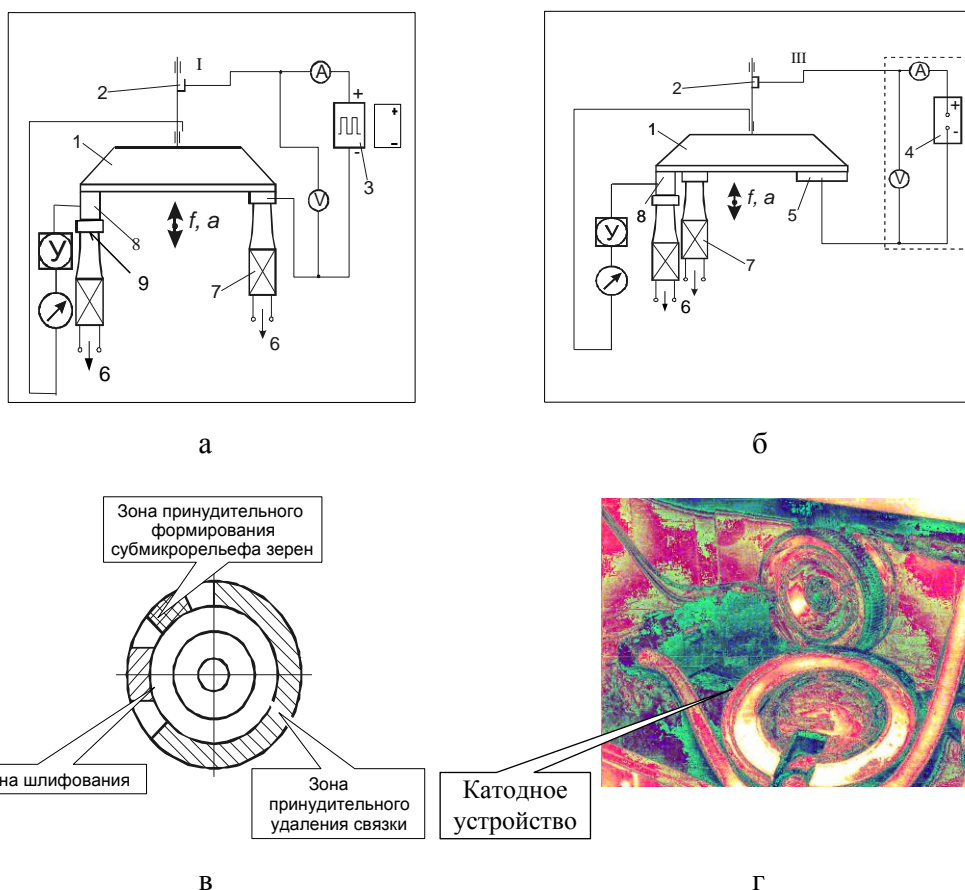


Рис. 7.2. Схемы способов алмазного шлифования с управлением приспособляемостью:

а – электроэрозионное удаление связки; б – электрохимическое удаление связки; в – зоны шлифования и управления РПК; г – зона шлифования и управления.  
 1 – алмазный круг; 2 – токосъемник; 3 – генератор импульсов ШГИ-40-440; 4 – источник постоянного тока; 5 – катодное устройство; 6 – к генератору ультразвуковых колебаний; 7 – устройство ультразвуковой правки; 8 – шлифуемый образец; 9 – концентратор.

Условие стабильности работы круга:

$$V_{\text{ус}} = V_{\text{изн}} + V_{\text{ур}} + V_{\text{зу}} + V_{\text{зш}},$$

где  $V_{\text{ус}}$  – скорость удаления связки в зоне шлифования;  $V_{\text{изн}}$  – скорость линейного износа зерен;  $V_{\text{ур}}$  – скорость линейного микроразрушения зерен в зоне управления шлифованием;  $V_{\text{зу}}$  – скорость линейного заглабления зерен в связку в зоне управления;  $V_{\text{зш}}$  – скорость линейного заглабления зерен в связку в зоне шлифования

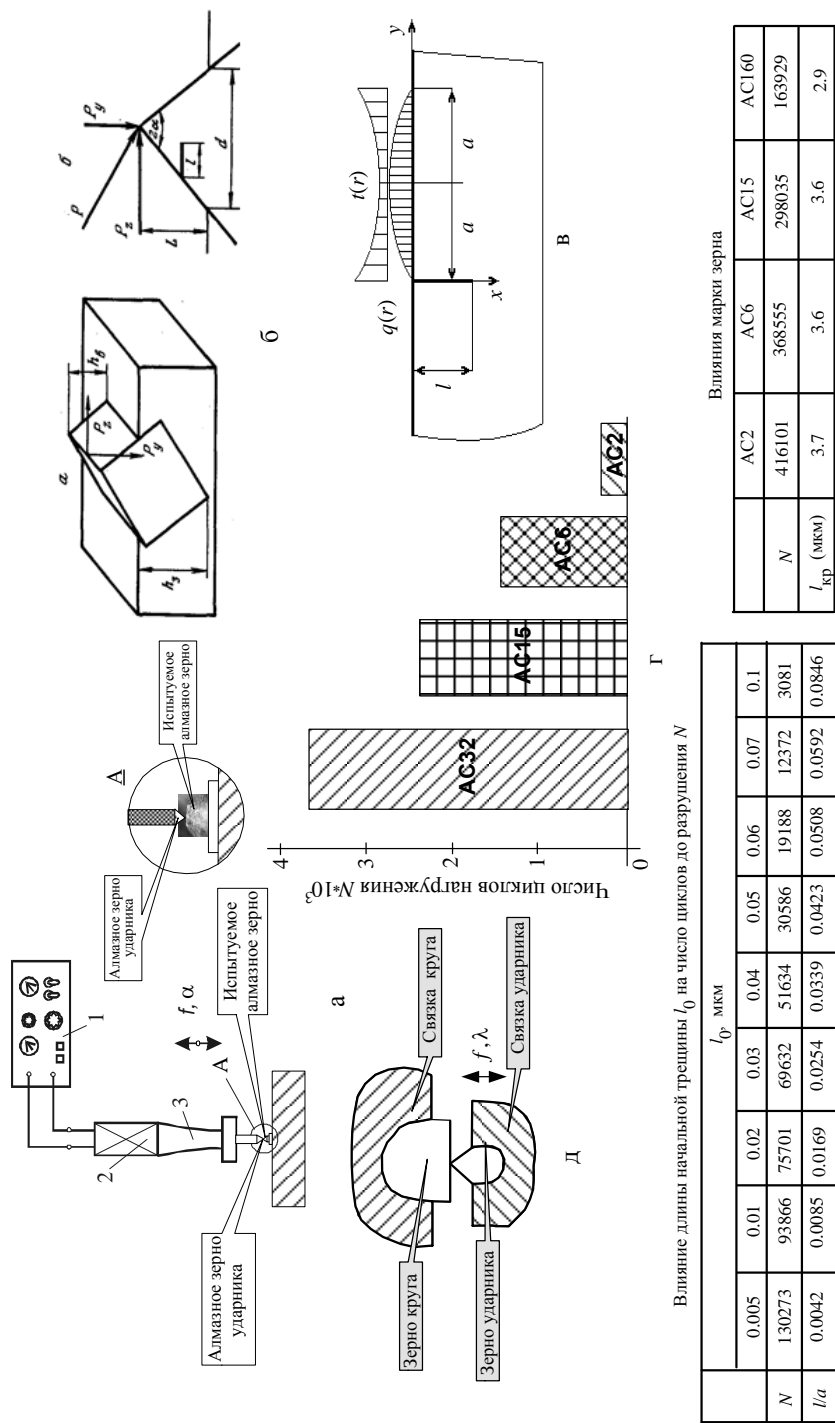


Рис. 7.3. Моделирование процесса формирования субмикрорельефа алмазных зерен: а – установка для моделирования усталостно-циклического разрушения; б – расчетная схема системы «зерно–связка»; в – эпюры напряжения в контакте зерна с СТМ; г – результаты эксперимента; д – модель взаимодействия зерна с СТМ; е – фото поверхности зерна.

1 – ультразвуковой генератор; 2 – магнитострикционный вибратор; 3 – концентратор

Анализ результатов, приведенных на рис. 7.3, позволяет на основании данных о длине начальной микротрещины  $l_0$ , критической длине трещины  $l_{кр}$  и числу циклов, за который начальная длина микротрещины разовьется до критической величины  $N$ , определить скорость развития микротрещины. По нашим результатам эта скорость  $dl/dN$  изменяется в диапазоне от  $1.8 \cdot 10^{-4}$  до  $4.6 \cdot 10^{-3}$  мм/цикл, что хорошо согласуется с результатами работы [71].

Теоретические исследования усталостно-циклического разрушения алмазных зерен проведены с использованием методики расчета, приведенной в гл. 6. Корректировка результатов теоретических исследований проводилась с использованием результатов эксперимента.

В практическом аспекте полученные результаты будут использованы в теоретическом модуле экспертной системы при назначении режимов ультразвуковых колебаний в зоне шлифования и/или в зоне управления (см. гл. 8). Окно программы подсистемы определения условий принудительного формирования субмикрорельефа на алмазных зернах представлено на рис. 7.4.

Исследования показали, что в процессе ультразвукового воздействия на круг [188] режущий субмикрорельеф алмазных зерен сохраняется в пределах износа зерна с высотой выступания от  $h_p > 90$  мкм до  $h_p = 35$  мкм (см. рис. 2.2 г). Исследование напряженно-деформированного состояния системы «зерно – СТМ» с площадкой износа (рис. 7.5 б, г) со сформированным на зерне субмикрорельефом (рис. 7.5 в, д) показал, что при одних и тех же условиях нагружения системы величина приведенных напряжений или энергии деформации увеличивается в десятки раз. Многочисленные модельные эксперименты показали высокую эффективность формирования на зернах субмикрорельефа как фактора повышения производительности процесса шлифования СТМ и повышения коэффициента использования алмазных зерен, т. к. алмазное зерно остается активно работающим практически до полного его износа.

Полученные результаты теоретического и экспериментального исследования процесса усталостно-циклического разрушения алмазных зерен подтверждают достоверность исследований, выполненных ранее нами [108] и другими авторами [71], и доказывают возможность и эффективность использования теоретической экспертной системы для определения оптимальных условий управления параметрами субмикрорельефа алмазных зерен при шлифовании СТМ.

**Примечание [V411]:** [a№3033]  
Новиков Н.В., Примак Л.П., Майстренко А.Л., Ващенко А.Д. Исследование распространения усталостных трещин в монокристаллах синтетических алмазов ДАН СССР.-1981 -256. С.1122-1126. {Book: Date 29/01/02 Time 23:01:48}

**Примечание [V412]:** [a№3032]  
Федорович В.А. Способы шлифования с комбинированным управлением режущим рельефом кругов. Вестник ХГПУ, Харьков. вып.45, с.26-28. {Book: Date 29/01/02 Time 22:32:53}

**Примечание [V413]:** Рис профили зерен из гл 2

**Примечание [V414]:** [a№3035]  
Федорович В.А., Хавин Г.Л., Палмиер Д., Шмитт М. Моделирование процесса ультразвуковой правки алмазных кругов. // Международный научно-технический сборник Резание и инструмент в технологических системах Вып 57. С.235-244. {Book: Date 29/01/02 Time 23:14:12}

**Примечание [V415]:** [a№3033]  
Новиков Н.В., Примак Л.П., Майстренко А.Л., Ващенко А.Д. Исследование распространения усталостных трещин в монокристаллах синтетических алмазов ДАН СССР.-1981 -256. С.1122-1126. {Book: Date 29/01/02 Time 23:01:48}

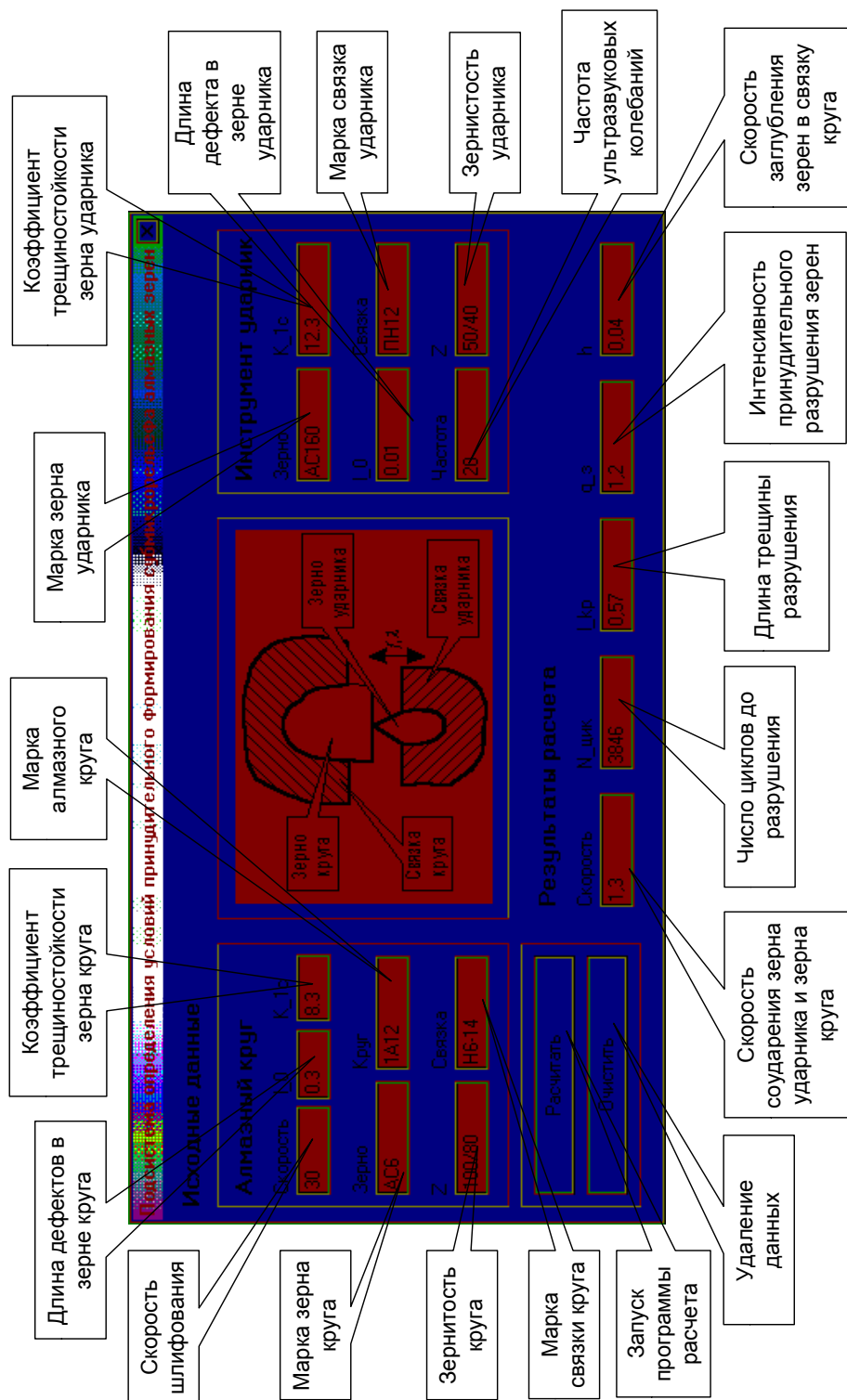


Рис. 7.4. Подсистема определения условий принудительного формирования субмикрорельефа алмазных зерен

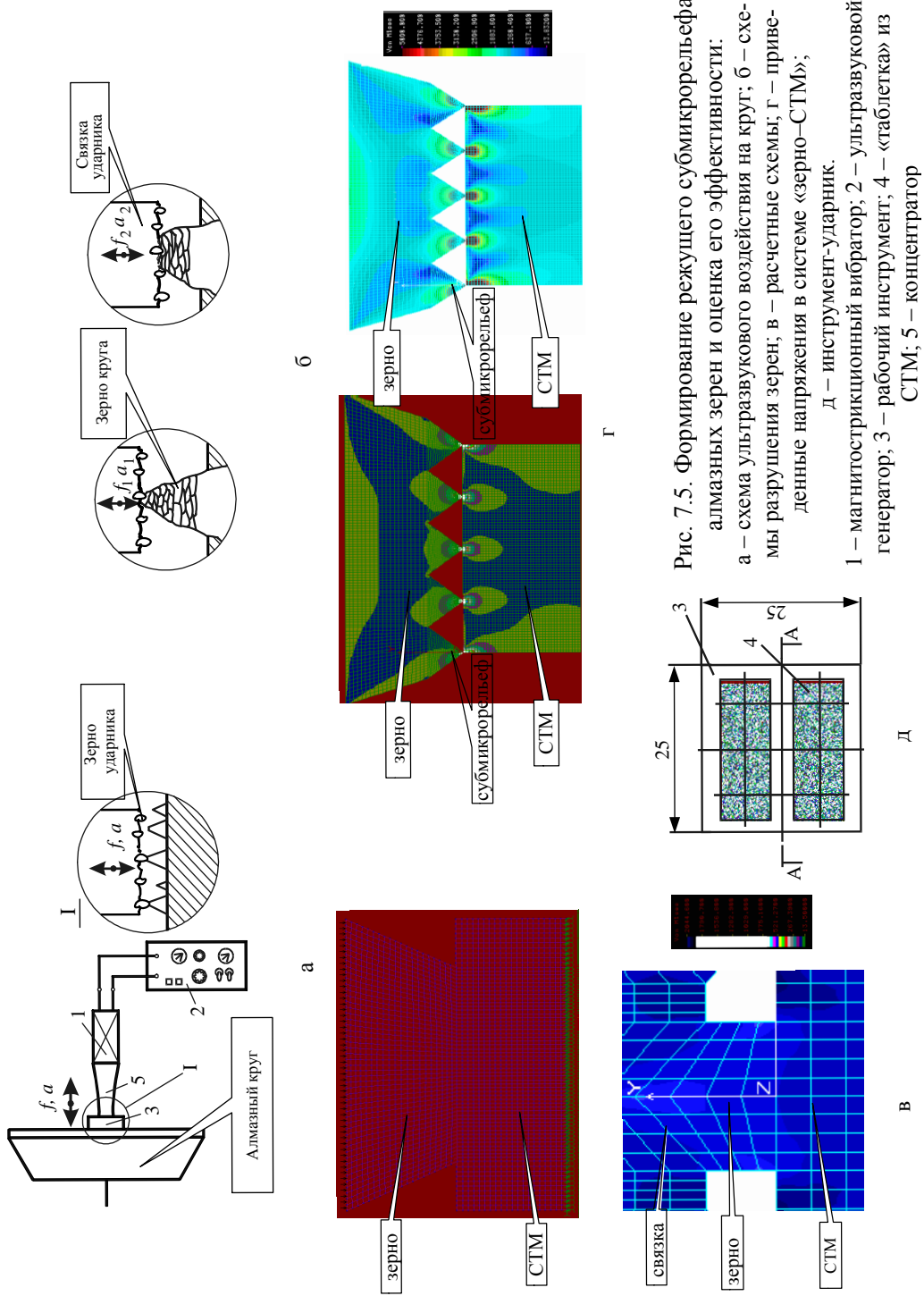


Рис. 7.5. Формирование режущего субмикрорельефа алмазных зерен и оценка его эффективности:  
а – схема ультразвукового воздействия на круг; б – схемы разрушения зерен; в – расчетные схемы; г – приведенные напряжения в системе «зерно-СТМ»; д – инструмент-ударник.  
1 – магнитострикционный вибратор; 2 – ультразвуковой генератор; 3 – рабочий инструмент; 4 – «таблетка» из СТМ; 5 – концентратор



Таким образом, разработана методология управления процессом приспособляемости и способы шлифования с комбинированным управлением выходными показателями процесса алмазного шлифования СТМ.

### 7.3. Моделирование процесса шлифования сверхтвердых материалов с управлением РПК

В предложенном процессе шлифования синхронно реализуются такие управляющие воздействия на поверхности круга и СТМ: 1) принудительное удаление связки с поверхности круга для обеспечения введения в работу новых зерен взамен износившихся и обеспечения требуемой величины фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ» на макроуровне; 2) принудительное формирование субмикрорельефа алмазных зерен за счет введения энергии ультразвуковых колебаний в зону шлифования и/или в зону управления. На модели рабочей поверхности круга первое соответствует перемещению вниз плоскости II–II, а второе – плоскости I–I (рис. 7.6). Схема оптимизации управляемого процесса шлифования приведена на рис. 7.7.

В гл. 5, 6 показано, что для того, чтобы при нормальном давлении  $P_n = 2$  МПа контактные напряжения достигли предела прочности СТМ, величина фактической площади контакта должна составлять не более 5.3 % от площади обработки и, следовательно, рабочая высота зерен при этом должна составлять 4/5 части от  $h_{\max}$  (при  $h_{кр} = 0.5H_3$ ), т. е. работать производительно при 100 % концентрации зерен в круге с рабочей высотой зерен  $h_p$  не менее чем 4/5 части от  $h_{\max}$ . Например, при 100 % концентрации круга зернистостью 100/80,  $h_p$  должно быть не менее 40 мкм. Однако, при такой рабочей высоте зерен часть из них будет выпадать из связки, даже не коснувшись обрабатываемого материала.

Экономически целесообразно осуществлять процесс шлифования только с рабочей высотой зерен, исключаяющей выпадение их из связки, не совершив полезной работы по диспергированию СТМ. Коэффициент участия зерен в работе  $K_y$ , при этом должен быть больше 1.



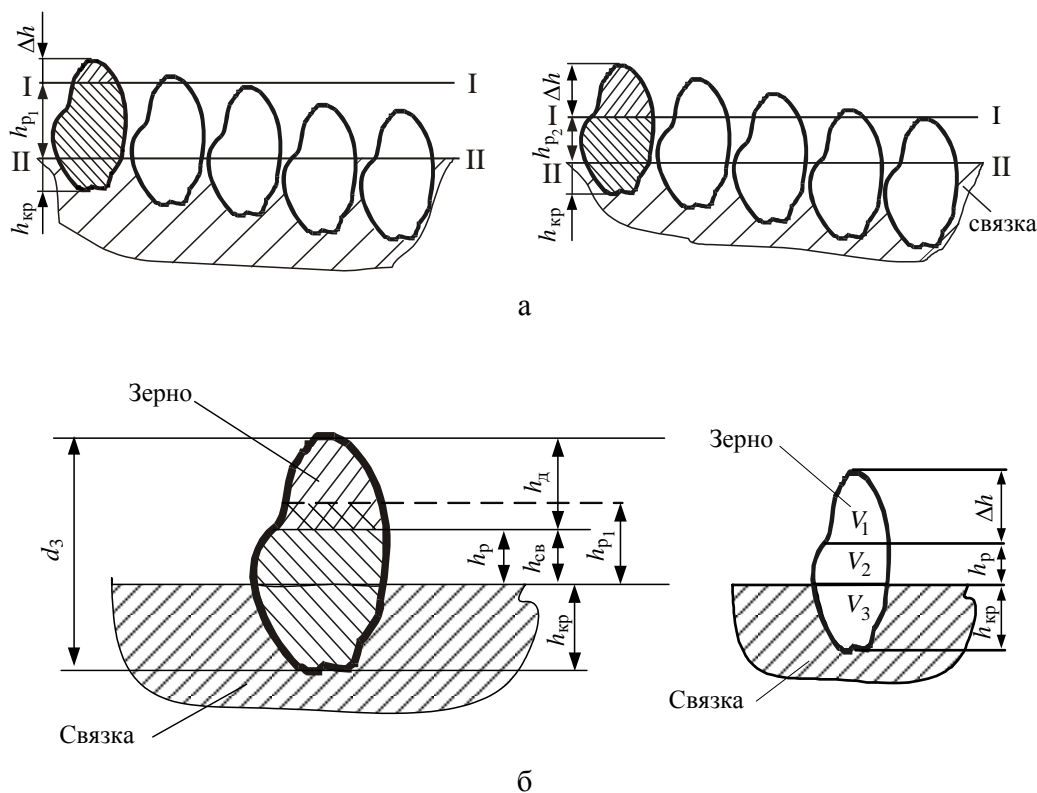


Рис. 7.6. Схематическая имитация управления рабочей высотой зерен (а) и износа алмазного зерна (б):

$h_{p1} > h_{p2}$  ;

$V_1$  – изношенная часть зерна; 
  $(V_2 + V_3)$  – выпавшая часть зерна;

– увеличение  $K_n$  за счет уменьшения  $h_p$

Для исключения контакта связки с обрабатываемым СТМ рабочая высота зерен для производительного процесса шлифования должна быть не меньше, чем  $2a - h_{кр}$ , и нагрузка на единичное зерно должна быть при этом достаточной для обеспечения его хрупкого самозатачивания. Эти условия могут быть обеспечены соответствующим выбором марки алмазных зерен, концентрации и зернистости их в круге, а также частотой ультразвуковых колебаний в зоне шлифования и/или управления. Для процесса прецизионной обработки СТМ рабочая высота зерен  $h_p$  должна быть меньше, чем  $2a - h_{кр}$ , но нагрузка на единичное зерно должна быть меньше его хрупкого самозатачивания (условие образо-

вания на зернах площадок износа), однако суммарная нагрузка в зоне контакта СТМ с кругом должна исключать процесс растрескивания поверхности СТМ. При большом числе зерен, находящихся в контакте, и наличии на них площадок износа увеличение нормальной нагрузки (поперечной подачи  $S_{\text{поп}}$ ) может привести к макроразрушению (растрескиванию) шлифуемого СТМ. Кроме этого за счет уменьшения числа зерен в контакте, т. е. снижения концентрации можно также уменьшить температуру шлифования [134].

Таким образом, при шлифовании по жесткой схеме или при больших нормальных давлениях по упругой схеме может происходить разрушение (растрескивание) поликристалла из-за его чрезмерного нагружения. Алмазные зерна с площадками износа при этом не разрушаются. Следовательно, при 100 % концентрации не представляется возможным устранение образовавшейся пары трения алмаза по алмазу путем увеличения нагрузки для разрушения зерен без объемного разрушения поликристалла. Реальным представляется путь уменьшения числа зерен в контакте, т.е. концентрации алмазов в круге. Например, уменьшение концентрации до 25 % уменьшает максимальное число зерен в контакте в 4 раза и тем самым исключает возможность макроразрушения (растрескивания) поликристалла, т. е. устраняет брак при обработке, вызванный чрезмерным нагружением СТМ.

Кроме того, уменьшая одновременно с концентрацией алмазов в круге рабочую высоту зерен, можно сохранить оптимальное число зерен в контакте, что обеспечивает на них нагрузку, достаточную для их самозатачивания микро-разрушением, и тем самым повысить коэффициент использования алмазных зерен в круге.

Следовательно, учитывая необходимость обеспечения оптимальной для процесса самозатачивания нагрузки на алмазное зерно  $P_{\text{опт}}$ , можно определить максимально допустимое число зерен в контакте исходя из того, что общая нагрузка на поликристалл, задаваемая режимами  $P_{\text{н}}$ ,  $S_{\text{поп}}$ ,  $V_{\text{кр}}$ ,  $z$ , марка зерна,  $f$  и  $a$ , не должна превышать величины  $P_{\text{пред}}$ , достаточной для его макроразрушения:

$$N \leq \frac{P_{\text{пред}}}{P_{\text{опт}}}. \quad (7.1)$$

Теоретический расчет оптимальной зоны, в которой исключается объемное разрушение (растрескивание) СТМ, проведен в 5.3.

**Примечание [V416]:** [a№421] Островерх Е.В. Тепловые явления и качество поверхностного слоя при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: Автореф. дис... канд. техн. наук. - Киев, 1986. - 17 с. {Book: Date 24/08/02 Time 13:08:59}

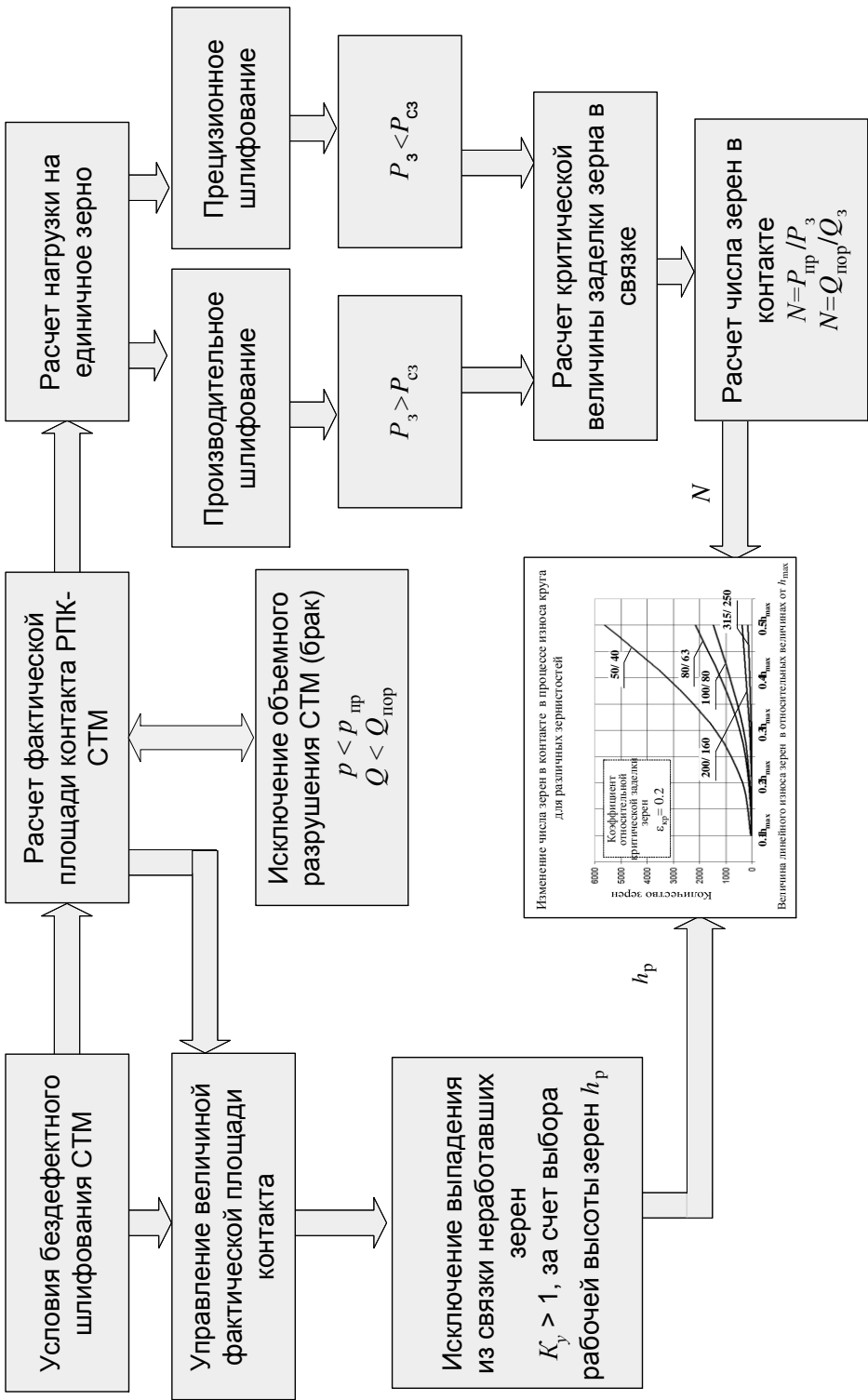


Рис. 7.7. Схема оптимального управления процессом приспособляемости при алмазном шлифовании STM:  
 $Q_{пор}$  – пороговая температура;  $P_3$  – нагрузка на единичное зерно;  $N$ ;  $P_{сз}$  – нагрузка на зерно для самозатачивания;  
 $P_{пм}$  – предельно допустимая нагрузка на STM

Согласно схеме расчета оптимальных условий шлифования СТМ (см. рис. 7.7), для производительного шлифования нагрузка на единичное зерно  $P_z$  должна быть достаточной для его самозатачивания у вершины (в зоне контакта). Для прецизионного шлифования нагрузка на зерно должна быть меньше величины его самозатачивания, т. е. должен реализовываться процесс истирания зерна и СТМ (пара трения «алмаз – алмаз»). При этом величина нагрузки на единичное зерно ограничивается предельно допустимой нагрузкой на СТМ, исключающей его растрескивание. Рабочая высота зерен  $h_p$  должна обеспечивать участие в работе всех зерен, т. е. коэффициент участия должен быть:  $K_y \geq 1$ . Эта высота обеспечивается соответствующей интенсивностью дозируемого удаления связки. По рассчитанным значениям  $h_p$  и  $N$  можем определить концентрацию алмазов в круге. Этот алгоритм позволяет вести расчеты в широком диапазоне. Например, если концентрация уже известна, то по этой схеме можно определять (для заданной производительности) скорость круга  $V_{кр}$ , зернистость, оптимальную марку зерна и т. д.

Такой алгоритм определения оптимальных условий производительного и прецизионного процесса шлифования реализован на ПЭВМ и вошел составной частью в теоретический модуль экспертной системы процесса шлифования СТМ (см. гл. 8).

#### **7.4. Разработка адаптивной системы управления параметрами РПК**

Для адаптивной системы управления параметрами РПК нами использована способность к электризации трущихся пар «алмаз – алмаз», «алмаз – металл».

Адаптивная система применена для уменьшения удельного расхода алмазного круга за счет периодического включения и выключения системы ультразвуковой правки круга. Когда на алмазных зернах отсутствуют площадки износа или они не значительной величины, ток электризации в цепи адаптивного управления не велик, и система вибрационного управления выключена. При образовании на алмазных зернах большого количества площадок износа за счет процесса трения алмаза по алмазу в цепи адаптивного управления увеличивается ток электризации. При этом автоматически включается цепь ультразвуковой

правки круга. После разрушения площадок износа и уменьшения площади контакта величина тока электризации в цепи падает, и цепь ультразвукового управления РПК отключается, т. е. процесс принудительного микроразрушения зерен прекращается.

Разработанная адаптивная схема управления процессом приспособляемости при алмазном шлифовании СТМ существенно упрощает применение этого процесса в автоматизированном производстве (рис. 7.8).

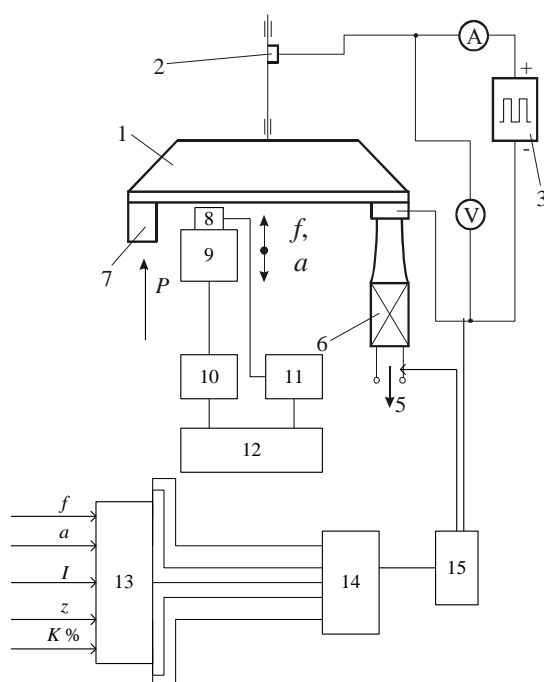


Рис. 7.8. Схема адаптивной системы управления параметрами рабочей поверхности круга:

1 – алмазный круг; 2 – токосъемник; 3 – генератор импульсов ШГИ-40-440; 4 – источник постоянного тока; 5 – к генератору ультразвуковых колебаний; 6 – устройство ультразвуковой правки; 7 – шлифуемый образец; 8 – съемник; 9 – вибропреобразователь; 10 – генератор; 11 – усилитель; 12 – синхронный детектор; 13 – микроконтроллер; 14 – схема управления; 15 – исполнительный механизм.

Условия стабильности работы круга:

$$V_{\text{ус}} = V_{\text{изн}} + V_{\text{уп}} + V_{\text{зз}} + V_{\text{зш}},$$

где  $V_{\text{ус}}$  – скорость удаления связи;  $V_{\text{изн}}$  – скорость линейного износа зерен в зоне шлифования;  $V_{\text{уп}}$  – скорость линейного микроразрушения зерен в зоне управления;  $V_{\text{зз}}$  – скорость линейного «заглубления» зерен в связку в зоне управления;  $V_{\text{зш}}$  – скорость «заглубления» зерна в зоне шлифования **см. рис. 2.11**

### 7.5. Способы ультразвукового шлифования с адаптивным комбинированным управлением РПК

Разработанная методология комплексного управления процессом приспособляемости существенно расширяет технологические возможности алмазного шлифования.

В традиционных процессах ультразвукового шлифования положительный эффект заключается, в основном, либо в повышении качества обработанной поверхности при условии продольной амплитуды колебаний в системе «РПК – деталь», либо в повышении производительности обработки за счет увеличения глубины внедрения зерен (при поперечной амплитуде колебаний в системе «РПК – деталь»). В нашем случае, когда практически нет внедрения зерен в обрабатываемый материал, роль энергии ультразвуковых колебаний, вводимых в зону шлифования, отличается от вышеуказанной (традиционной). Основное назначение ультразвуковых колебаний в зоне шлифования – способствовать процессу самозатачивания (формирования режущего субмикрорельефа) алмазных зерен, т. е. минимизировать процесс образования площадок износа. При этом продольные колебания в системе будут давать только отрицательный результат, т. к. будут способствовать интенсивности образования площадок износа. И только поперечные колебания в системе «РПК – СТМ» будут способствовать процессу самозатачивания алмазных зерен.

Экспериментальные исследования интенсивности образования площадок износа показали, что при продольных колебаниях в системе «РПК – СТМ» площадки износа образуются в 1.5 – 2 раза быстрее, чем при обычном алмазном шлифовании, а при поперечных колебаниях зерна могут оставаться с развитым рельефом практически до их износа до уровня связки. Процесс ультразвукового шлифования реализован путем подачи ультразвуковых колебаний на обрабатываемый СТМ (см. рис. 7.2), закрепленный на концентраторе с вибратором 7. Энергия ультразвуковых колебаний в зону шлифования, и/или в зону управления подается от одного ультразвукового генератора типа УЗМ-1,5. Подача энергии ультразвуковых колебаний в зону шлифования реализует выдвинутый Б. И. Костецким принцип инверсии процесса приспособляемости за счет изменения динамики нагружения взаимодействующих поверхностей [72].

Известен способ ультразвуковой правки кругов с применением генератора ультразвуковых колебаний, магнитострикционного вибратора, концентрато-

**Примечание [V417]:** [a№3037]  
Костецкий Б.И., Шульман А.П., Ляшко В.А., Носовский И.Г. Инверсия структурной приспособляемости в процессах финишной алмазной обработки // Синтетические алмазы - ключ к техническому прогрессу. - Киев. - 1977. Ч.1, - С. 273-279. {Book: Date 24/08/02 Time 15:45:31}

ра и ударника [91]. По данным Д. Кумабэ [91] такой способ правки позволяет в 5 – 6 раз улучшить качество шлифуемой поверхности. Однако такой способ правки при шлифовании СТМ кругами на металлической связке сам по себе не решит проблему эффективной обработки СТМ, поскольку процесс шлифования закончится в пределах одной высоты выступания зерен над связкой. Разработанные в [33] способы шлифования с управлением параметрами режущего рельефа круга, при всей их эффективности, не предусматривают непосредственного формирования субмикрорельефа алмазных зерен. Для устранения недостатков, присущих двум вышеуказанным способам шлифования и использования их достоинств, нами разработаны способы шлифования с комбинированным управлением РПК. Способы предусматривают двойное воздействие на рабочую поверхность в автономной зоне. Для обеспечения постоянного хрупкого микроразрушения рабочей поверхности алмазных зерен и исключения образования на них площадок износа они подвергаются непрерывному принудительному формированию субмикрорельефа на алмазных зернах с требуемой интенсивностью. А для непрерывного, последовательного введения в работу все новых алмазных зерен взамен износившихся в автономной зоне осуществляется электроэрозионное или электрохимическое удаление связки с интенсивностью, равной интенсивности износа зерен. На основе такого комбинированного управления режущим рельефом круга нами предложено три способа шлифования. Для всех них присуще принудительное управление развитостью субмикрорельефа алмазных зерен за счет введения энергии ультразвуковых колебаний в зону управления (см. рис. 7.2).

Вибрационное воздействие на зерна осуществляется плоским инструментом-ударником (см. рис. 7.5 а, е) с размерами  $25 \times 25 \times 15$ , в рабочей поверхности которого закреплены «таблетки» из алмазосодержащего слоя на прочной металлической связке с мелкими и прочными алмазными зернами (АС160Т). Этот инструмент 3 крепится к концентратору колебаний 5 магнитострикционного вибратора 1. Работа вибратора приводится в действие от генератора ультразвуковых колебаний 2. Расчет формы и размеров концентратора 5 и способ крепления к нему плоского инструмента – ударника осуществлен по известной методике [91]. Частота и амплитуда колебаний определяются теоретически либо экспериментально в зависимости от требуемой интенсивности микроразрушения зерен. Теоретическое определение условий принудительного формирования субмикрорельефа алмазных зерен осуществляется с использованием теоре-

**Примечание [V418]:** [a№231] Ку-мабэ Д. Вибрационное резание: Пер. с яп. С.Л. Масленникова / Под ред. И.И. Портнова, В.В. Белова. - М.: Машиностроение, 1985. - 424 с. {Book: Date 24/08/02 Time 15:46:05}

**Примечание [V419]:** [a№231] Ку-мабэ Д. Вибрационное резание: Пер. с яп. С.Л. Масленникова / Под ред. И.И. Портнова, В.В. Белова. - М.: Машиностроение, 1985. - 424 с. {Book: Date 31/08/02 Time 13:49:22}

**Примечание [V420]:** [a№284] Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. - Харьков: Вища шк., 1985. - 184 с. {Book: Date 31/08/02 Time 14:02:05}

**Примечание [V421]:** [a№231] Ку-мабэ Д. Вибрационное резание: Пер. с яп. С.Л. Масленникова / Под ред. И.И. Портнова, В.В. Белова. - М.: Машиностроение, 1985. - 424 с. {Book: Date 24/08/02 Time 14:39:16}

тического модуля экспертной системы (см. рис. 7.4). Такие комбинированные способы управления приспособляемостью взаимодействующих поверхностей позволяют более полно использовать потенциальные режущие свойства алмазных зерен и повысить эффективность шлифования СТМ.

Для обработки СТМ на основе нитрида бора, когда интенсивность линейного износа алмазных зерен относительно невелика, а, следовательно, и интенсивность удаления связки должна быть соответственной, может быть применен наиболее простой способ шлифования с вибрационно-эрозионным управлением РПК от источника постоянного тока (см. рис. 7.2 а). Здесь электроэрозионный разряд (удаляющий связку) между металлической поверхностью инструмента-ударника и связкой осуществляется за счет изменяющегося зазора при вибрациях от  $h_{\max}$  до  $h_{\min}$ . Достоинством данного способа является простота реализации и отсутствие необходимости применения генераторов импульсного тока типа ШГИ-40-440 [11].

При обработке СТМ на основе алмаза, когда интенсивность износа алмазных зерен чрезвычайно высока, а, следовательно, требуется такое же интенсивное управляющее воздействие на связку круга, использование источника постоянного тока оказывается недостаточным. В этом случае для эрозионного управления параметрами РПК применяется генератор импульсов ШГИ-40-440 (см. рис. 7.2 а). Режимы работы этого генератора определяются экспериментально в зависимости от требуемой интенсивности управляемого воздействия на связку круга.

Данный способ обладает более широкими возможностями по сравнению с первым, но он дороже.

Наибольшей интенсивностью удаления связки с рабочей поверхности круга обладает способ ее электрохимического растворения в зоне управления [148]. Поэтому, например, при заточке резцов из СТМ совместно со стальной державкой, когда кроме удаления связки требуется еще и удалять продукты шлифования (металлическую стружку), наиболее эффективен будет способ шлифования с вибрационно-электрохимическим управлением режущим рельефом круга (РПК) (см. рис. 7.2 б).

В данном случае на рабочей поверхности круга имеются три зоны (см. рис. 7.2 в): зона шлифования; зона принудительного формирования субмикрорельефа алмазных зерен; зона электрохимического управления развитостью РПК.

**Примечание [V422]:** [a№1067] Беззубенко Н.К. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов: Дис... докт. техн. наук: 05.03.01. - Харьков, 1996. - ?? с. {Book: Date 31/08/02 Time 14:03:29}

**Примечание [V423]:** [a№518] Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении: Уч. пособие / Под. ред. А.И. Грабченко. - Харьков: ХГПУ, 1999. - 436 с. {Book: Date 31/08/02 Time 14:04:46}



Общим для всех трех способов шлифования являются условия стабильности процесса шлифования:

$$V_{\text{ус}} = V_{\text{изн}} + V_{\text{ур}} - V_{\text{зг}}, \quad (7.2)$$

где  $V_{\text{ус}}$  – скорость удаления связки;

$V_{\text{изн}}$  – скорость линейного износа зерен в зоне шлифования;

$V_{\text{ур}}$  – скорость линейного микроразрушения зерен в зоне ультразвукового шлифования и управления субмикрорельефом зерен;

$V_{\text{зг}}$  – скорость линейного заглабления (шаржирования) алмазных зерен в связку в зоне шлифования и управления.

При отключении управляющих воздействий на рабочую поверхность круга на алмазных зернах в массовом порядке образуются площадки износа и процесс трансформируется практически в процесс трения «алмаз – алмаз» с величиной съема на наноуровне. При использовании прецизионного (сверхточно-го) оборудования в этих условиях можно реализовать ультрапрецизионное шлифование сверхтвердых материалов.

## 7.6. Роль частоты собственных и вынужденных колебаний алмазных зёрен при шлифовании сверхтвёрдых материалов

Гетерогенные структуры типа поликристаллических сверхтвёрдых материалов имеют существенные различия физико-механических свойств составляющих их структур как в силу анизотропии свойств их кристаллитов, так и из-за различия свойств их структур (алмазная структура + металлическая связка) для композиционных сверхтвёрдых материалов типа славутич или твесал.

СТМ типа баллас и карбонадо имеет структуру с размерами алмазных кристаллитов порядка 100 – 300 мкм. Если учесть, что при алмазном шлифовании этих материалов практически отсутствует внедрение в них алмазных зерен, а величина пятен контакта в системе «зерно – СТМ» колеблется от долей мкм до нескольких мкм, то в реальном процессе оказывается, что каждый кристаллит СТМ представляет собой самостоятельный объект обработки, т. е. каждый кристаллит (монокристалл) обрабатывается отдельно (см. рис. 4.12). Роль анизотропии свойств кристаллитов СТМ и алмазных зерен в процессе приспособляемости рассмотрены в гл.гл. 4 и 6.

**Примечание [V424]:** Стр: 271  
БЭС Доб АЛМАЗ, минерал, одна из кристаллических полиморфных модификаций углерода, С. Разновидности алмаза - баллас, карбонадо, борт.

В данных исследованиях определялась роль вынужденных (наложением ультразвуковых колебаний в зоне шлифования и/или в зоне управления) колебаний алмазных зерен на возможность отслеживания анизотропии кристаллитов СТМ.

С учетом собственных и вынужденных колебаний алмазных зерен в связке представляет интерес возможность «попадания» зерна во «впадину» (мягкую грань), в зависимости от скорости шлифования  $V_{кр}$ , размеров кристаллитов  $L$ , модуля упругости связки. Эти условия будут определяться и частотой собственных колебаний зерен в круге.

Частоту собственных и вынужденных колебаний алмазных зерен в круге в зависимости от физико-механических свойств связки и алмазных зерен, их размеров (зернистости) определяли методом конечных элементов в пакете программ типа Ansys при 3D моделировании. Имитационная модель расчета собственных и вынужденных колебаний алмазных зерен приведена на рис. 7.9.

Результаты расчетов зависимости величины собственных колебаний алмазных зерен от модуля упругости связки приведены в табл. 7.1.

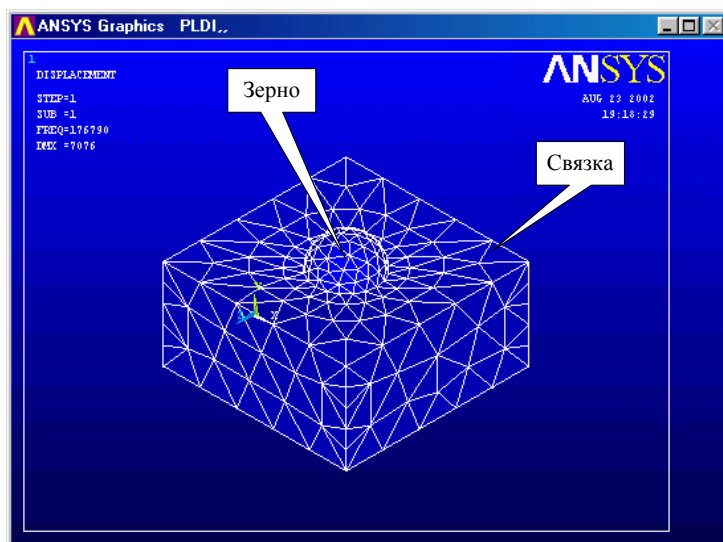
Таблица 7.1 – Влияние модуля упругости связки на частоту собственных колебаний алмазных зерен

Модуль упругости связки $E$ , ГПа	70	100	130	160	190
Частота собственных колебаний зерен $f$ , Гц	2876	5732	8673	11556	14776

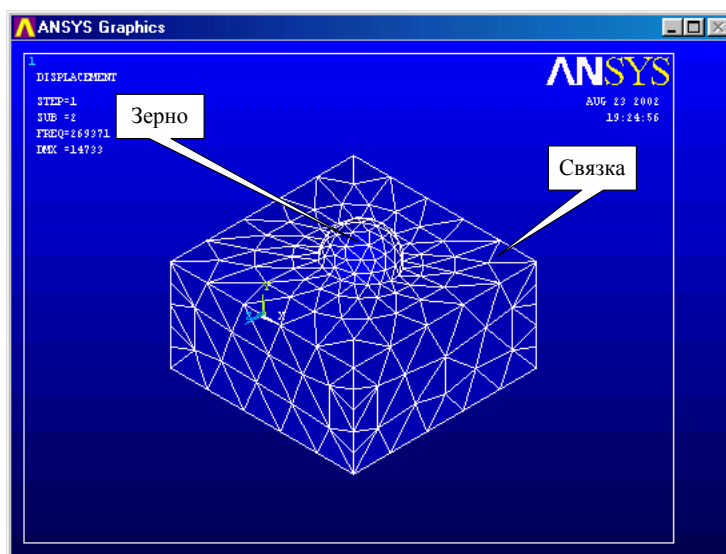
Установлено, что, изменяя модуль упругости связки, можно в широком диапазоне управлять частотой собственных колебаний алмазных зерен. Чем выше модуль упругости связки, тем больше частота собственных колебаний алмазных зерен, тем больше вероятность отслеживания алмазным зерном анизотропии свойств кристаллитов СТМ, тем вероятнее реализация производительного процесса шлифования (см. схему на рис. 4.12).

Порядок расчета режимов шлифования в зависимости от величины собственных колебаний зерен, скорости круга и величины кристаллитов СТМ и зерен приведен в п. 4.7.

Расчеты, проведенные в п. 4.7, показали, что наиболее перспективным может являться способ принудительного колебания алмазных зерен в связке путем введения ультразвуковых колебаний в зону шлифования и/или в зону управления. В связи с этим частоту ультразвуковых колебаний следует выбирать из условия обеспечения схемы производительного (см. рис. 4.12 а, б) или прецизионного (доводочного) шлифования (см. рис. 4.12 в, г).



а



б

Рис. 7.9. Имитационная модель расчета собственных и вынужденных колебаний алмазных зерен:  
верхнее (а) и нижнее (б) положения зерна в процессе поперечных колебаний

Таким образом, при необходимости осуществлять производительный или прецизионный процесс алмазного шлифования различных СТМ необходимо с

учетом величины их кристаллитов и модуля упругости связки, собственных или вынужденных колебаний алмазных зерен в связке назначать соответствующую скорость шлифования.

Введение в зону шлифования и/или управления энергии ультразвуковых колебаний открывает за счет регулирования частоты вынужденных колебаний алмазных зерен новые возможности для реализации либо производительного, либо прецизионного шлифования. Так, например, как было показано в п. 4.7, в случае обработки СТМ с мелкими кристаллитами для того, чтобы алмазное зерно «успело» отследить анизотропию их свойств, необходимо вести процесс со скоростью шлифования не более 5 м/с, однако такой процесс будет малоэффективным. Увеличив частоту колебаний алмазных зерен путем введения в зону шлифования энергии ультразвуковых колебаний с частотой 30 кГц, можно реализовать производительную схему шлифования даже при скорости круга более 30 м/с.

Подсистема определения собственных и вынужденных колебаний алмазных зерен вошла составной частью в теоретический модуль экспертной системы процесса шлифования СТМ.

### 7.7. Разработка способа термоактивируемой доводки лезвийного инструмента из СТМ на основе алмаза

Дискуссия о преимуществах шлифования или лезвийной обработки в своей основе сводится к эффективности абразивной обработки, поскольку показатели лезвийной обработки во многом определяется качеством заточки инструмента. Так, например, при соответствующем качестве заточки инструментов из СТМ они с успехом могут заменить природный алмаз.

Существующая технология заточки лезвийного инструмента из СТМ кругами базируется на двух операциях – предварительное шлифование кругами на металлической связке с управлением режущим рельефом круга и доводка мелкозернистыми кругами на органической связке [165].

В гл. 4 вскрыта неоднозначная роль уровня приспособляемости в эффективности процесса алмазного шлифования СТМ. Так, если для производительного шлифования третий период приспособляемости [143] не пригоден, то возможно в этом периоде можно осуществлять термоактивируемую доводку инструмента из СТМ. Известно, что лезвийный инструмент из сверхтвердых

**Примечание [V425]:** [a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 06/06/02 Time 20:25:21}

**Примечание [V426]:** [a№3080] Пташников В.С. Влияние механизма износа круга на удельный расход абразива при шлифовании // Абразивы. - 1978. Вып. 9. - С. 6-10. {Book: Date 31/08/02 Time 14:08:42}

материалов на основе алмаза не рекомендуется применять для обработки черных металлов из-за высокой степени химического сродства взаимодействующих материалов и, как следствия, большой интенсивности их износа. По данным Т. Н. Лоладзе и Г. В. Бокучава [97, 98] определяющим при этом является диффузионный и окислительный вид износа. Скорость диффузионного износа алмазной пирамиды при резании армко-железа со скоростью 35 м/с составила  $V_d = 2 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/\text{мин}$ . В связи с этим можно предположить, что при износе алмазного круга до контакта металлической связки с обрабатываемой поверхностью СТМ на основе алмаза может иметь место диффузионный и окислительный износ микрогребешков, т. е. осуществляться процесс термоактивируемой доводки. Проанализировав все выше изложенное, можно предположить следующее: применение алмазного шлифовального круга на металлической связке на основе железа после окончательного износа алмазных зерен позволит произвести доводку обрабатываемой поверхности режущего инструмента из СТМ на основе алмаза. Происходит своеобразная замена: алмазный шлифовальный круг, то есть его металлосодержащая связка становится обрабатываемым материалом, а поверхность СТМ, ее микронеровности выступают в роли мельчайших режущих инструментов – абразивных зерен. При этом используется металлическая связка на основе железа, которая с одной стороны обеспечивает максимальное алмазоудержание (в производительном процессе), а с другой обеспечивает максимальную скорость диффузии алмаза в связку. Требуемая высокая температура для процесса диффузии обеспечивается за счет трения связки с обрабатываемым СТМ. Фактически реализуется процесс, аналогичный процессу доводки алмазного инструмента на нагретом чугунном диске [171]. Таким образом, есть основание считать, что в третьем периоде традиционного процесса алмазного шлифования СТМ возможно осуществление процесса термоактивируемой доводки обработанной поверхности. После предварительного (производительного) процесса шлифования с управлением параметрами РПК [143] выключается система управления и прекращается подача СОТС в зону шлифования. Алмазные зерна интенсивно изнашиваются и железосодержащая связка круга входит в контакт с предварительно обработанной поверхностью СТМ. В этом случае начинают действовать установленные выше механизмы износа микрогребешков на обработанной поверхности, т. е. механизм окисления, диффузии и графитизации.

**Примечание [V427]:** [a№3085]  
Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В. Износ алмазов и алмазных кругов. - М.: Машиностроение, 1967. - 112 с. {Book: Date 30/06/02 Time 12:08:31}

**Примечание [V428]:** [a№317] Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В. К теории диффузионного износа алмазного абразивного инструмента // Тр. ВНИИАШ. - 1985. - № 5. - С. 103-112. {Book: Date 30/06/02 Time 12:10:16}

**Примечание [V429]:** [a№3249] Сирадзе А.М. Исследования обрабатываемости алмаза. Тбилиси, изд. ГПИ им. Ленина, 1975. 185 с. {Book: Date 30/06/02 Time 11:57:44}

**Примечание [V430]:** [a№3080] Пташников В.С. Влияние механизма износа круга на удельный расход эльбора при шлифовании // Абразивы. - 1978. Вып. 9. - С. 6-10. {Book: Date 31/08/02 Time 14:08:42}

Таким образом, появляется возможность осуществлять предварительную (с включенной системой управления режущим рельефом круга) и прецизионную (доводочную – с выключенной системой управления режущим рельефом круга) операции обработки СТМ одним и тем же крупнозернистым кругом любой зернистости с прочной металлической связкой на железной основе.

Если после предварительной обработки выключить систему управления режущим рельефом круга, то через 30 – 60 секунд алмазные зерна круга изнашиваются до уровня металлической связки [143, 144]. Этот момент и является началом доводочного периода шлифования, характеризующегося трением связки с поверхностью обрабатываемого СТМ. Учитывая многокомпонентность алмазного поликристалла, алмазосодержащего слоя и металлической связки круга, можно ожидать в пределах пятна контакта появления различных температурных условий, вызванных трением алмаза по алмазу, алмаза по металлической связке или связки по металлическим включениям СТМ.

Завершающая стадия обработки – доводка поверхности СТМ – заключается в химических процессах, точнее диффузионных и окислительных процессах, протекающих между железосодержащей металлической связкой шлифовального круга и микронеровностями, которые образуются на поверхности СТМ после предыдущего этапа обработки.

Ориентировочно интенсивность термоактивируемой доводки можно определить как сумму интенсивностей процесса «огневого бурения»  $V_{ог}$  [181, 204] и диффузионного процесса  $V_{диф}$ :

$$V_c = V_{ог} + V_{диф}. \quad (7.3)$$

В обосновании возможности термоактивируемой доводки использованы результаты исследований Т. Н. Лоладзе и Г. В. Бокучавы по износу алмазного инструмента [97, 98] и методику Г. П. Черепанова и Х. Г. Тхагапсоева по методу «огневого бурения» для износа алмазных правящих карандашей [131, 181, 204].

Подсистема «Dovodka», входящая в состав общей экспертной системы процесса алмазного шлифования СТМ, предназначенная для количественной оценки результатов термоактивируемой доводки, построена по следующему алгоритму:

- определение параметров 3D топографии обрабатываемой поверхности СТМ;

**Примечание [V431]:** [a№3080]  
Пташников В.С. Влияние механизма износа круга на удельный расход абразива при шлифовании // Абразивы. - 1978. Вып. 9. - С. 6-10. {Book: Date 31/08/02 Time 14:08:42}

**Примечание [V432]:** [a№3085]  
Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В. Износ алмазов и алмазных кругов. - М.: Машиностроение, 1967. - 112 с. {Book: Date 30/06/02 Time 12:14:05}

**Примечание [V433]:** [a№317]  
Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В. К теории диффузионного износа алмазного абразивного инструмента // Тр. ВНИИАШ. - 1985. - № 5. - С. 103-112. {Book: Date 30/06/02 Time 12:10:16}

**Примечание [V434]:** [a№3248]  
Тхагапсоева Х.Г., Хапачев Б.С. Об износе алмаза при правке абразивных кругов // Сверхтвердые материалы. - 1987. - № 2. - С.30-35. {Book: Date 30/06/02 Time 12:16:15}

**Примечание [V435]:** [a№612]  
Тхагапсоев Х.Г., Шхануков М.Х., Хапачев Б.С., Абретов М.Х. Определение контактной температуры при правке абразивных кругов алмазным инструментом // Сверхтверд. матер. - 1983. - № 4. с. 44-48. {Book: Date 30/06/02 Time 12:17:03}

**Примечание [V436]:** [a№3193]  
Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения.-М.,Наука,1974.-640 с. {Book: Date 30/06/02 Time 12:20:28}

- определение параметров 3D топографии рабочей поверхности круга (РПК);
- определение фактической площади контакта в системе «РПК – СТМ»;
- расчет интенсивности термоактивируемой доводки обрабатываемой поверхности СТМ.

Важным элементом, определяющим эффективность процесса термоактивируемой доводки, является температура в контакте «РПК – СТМ». Приняв за основу идеализированную схему контакта круга с обрабатываемым поликристаллом алмаза (рис. 7.10 а, б) при условии износа зерен до полного контакта связки с СТМ, средний рост температуры в пределах единично нагретой точки при средних скоростях скольжения можно получить из соотношения [199]:

$$\theta = \frac{6.4 \mu N V}{b (\lambda_1 + \lambda_2)}, \quad (7.4)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения;

$N$  – контактная нагрузка, Па;

$V$  – скорость скольжения, м/с;

$b$  – сторона квадрата контакта, м;

$\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности двух скользящих тел, Вт/(м·К).

Принимая  $N = 2$  МПа,  $V = 30$  м/с,  $b = 60$  мкм, расчет производим для случая контакта алмаза с алмазом, а также алмаза с Fe, Cu, Ni, Sn, процентное содержание которых в связке М6-14 наибольшее. Результаты расчетов, представленные в табл. 7.2, указывают, во-первых, на возможность появления достаточно высоких температур, соизмеримых с температурами окисления, диффузии, пластической деформации и даже графитизации СТМ, и, во-вторых, на наличие значительных температурных градиентов.

Таблица 7.2 – Расчетные контактные температуры СТМ с различными компонентами алмазного круга

Контактирующий материал	$\theta$ , град/мм <sup>2</sup>
Алмаз (25 %)	1100
Железо (51 %)	1100
Медь (32 %)	1550
Никель (9 %)	1400
Олово (8 %)	1000

**Примечание [V437]:** Стр: 276  
[a№3326] Ходоревский М.Г. Исследование процесса алмазного шлифования синтетических сверхтвердых материалов: Дис... канд. техн. наук: 05.03.01. - X., 1975. - 214 с. {Book: Date 01/09/02 Time 22:33:46}



Для определения скорости износа поликристалла алмаза, вызываемого разрушением поверхностного слоя под действием термоупругих напряжений, воспользуемся формулой «огневого бурения», предложенной в работах [131, 204]:

$$V_{\text{ог}} = \frac{f \lambda}{l \rho_1 c} \left[ \frac{\alpha E T}{(1 - \mu) \sigma_s} - 1 \right], \quad (7.5)$$

где  $f$  – фактическая площадь контакта алмаза,  $\text{мкм}^2$ ;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности алмаза,  $\text{Вт}/(\text{м К})$ ;

$l$  – толщина нагретого приповерхностного слоя кристалла,  $\text{мкм}$ ;

$\rho_1$  – плотность алмаза,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$c$  – удельная теплопроводность,  $\text{Дж}/(\text{кг К})$ ;

$\alpha$  – коэффициент термического расширения,  $\text{К}^{-1}$ ;

$E$  – модуль Юнга алмаза,  $\text{ГПа}$ ;

$T$  – контактная температура,  $\text{К}$ ;

$\mu$  – коэффициент Пуассона;

$\sigma_s$  – предел прочности при сжатии,  $\text{ГПа}$ .

За толщину нагретого приповерхностного слоя поликристалла принимали среднее значение высоты микронеровностей на контактной поверхности СТМ, образовавшихся при предварительной обработке (шлифования с управлением режущим рельефом круга). Фактическую площадь контакта СТМ со шлифовальным кругом определяли через относительную опорную площадь поверхности, полученную путем компьютерной обработки результатов лазерного сканирования соответствующих поверхностей [124] и определяли объем материала, находящегося в шероховатом слое глубиной, соответствующей уровню максимальной шероховатости. При выборе величин теплопроводности и теплоемкости алмаза учитывали характер их температурной зависимости [2]. Температуры контакта принимали на основании данных [134].

Производительность термоактивируемой доводки, рассчитанная по формуле (7.5), характеризует скорость термоактивируемого разрушения поверхности СТМ на стадии доводочного шлифования и составляет  $0.016 - 0.03 \text{ мм}^3/\text{мин}$ .

Полученные в результате лазерного сканирования топографии предварительно обработанной поверхности СТМ (шлифование с управлением рельефом круга [124]) показали, что объем материала, находящегося в слое толщиной  $s$

**Примечание [V438]:** Стр: 277  
[a№3248] Тхагапсоева Х.Г., Хапачев Б.С. Об износе алмаза при правке абразивных кругов // Сверхтвердые материалы. - 1987. - № 2. - С.30-35. {Book: Date 01/09/02 Time 10:32:55}

**Примечание [V439]:** Стр: 277  
[a№3043] Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. - М.: Наука, 1974. - 640 с. {Book: Date 01/09/02 Time 10:32:32}

**Примечание [V440]:** [a№3087]  
Федорович В.А., Русанов В.В., Кавалец М., Янковяк М. Новые возможности изучения параметров режущего рельефа алмазных кругов // Высокие технологии, развитие и кадровое обеспечение. Сборник научных трудов НТУ "ХПИ". - Харьков: НТУ "ХПИ". - 2001. - С. 214-222. {Book: Date 31/08/02 Time 14:16:05}

**Примечание [V441]:** [a№3063]  
Алмаз : Справочник / Д.В. Федосеев, Н.В. Новиков, А.С. Вишневский и др. - Киев: Наук. думка, 1981. - 76 с. {Book: Date 31/08/02 Time 14:17:09}

**Примечание [V442]:** [a№421] Островерх Е.В. Тепловые явления и качество поверхностного слоя при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: Автореф. дис... канд. техн. наук. - Киев, 1986. - 17 с. {Book: Date 31/08/02 Time 14:17:58}

**Примечание [V443]:** Стр: 278  
[a№3087] Федорович В.А., Русанов В.В., Кавалец М., Янковяк М. Новые возможности изучения параметров режущего рельефа алмазных кругов // Высокие технологии, развитие и кадровое обеспечение. Сборник научных трудов НТУ "ХПИ". - Харьков: НТУ "ХПИ". - 2001. - С. 214-222. {Book: Date 01/09/02 Time 22:37:59}



максимальную шероховатость поверхности (параметр  $S_v$ ) на площади передней поверхности пластины ДАП, составляет  $4.8 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3$ . Таким образом, теоретический объем СТМ, соответствующий шероховатости предварительно обработанной поверхности, может быть снят за

$$\tau = \frac{4/8 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3}{0.03 \text{ мм}^3 / \text{мин}} = 9.6 \text{ с.} \quad (7.6)$$

Диффузию принято считать медленным процессом, а ее роль – несущественной в общем износе. Однако, исследования, проведенные Т. Н. Лоладзе [96], Г. В. Бокучава [98], А. С. Вишневым [24], показывают, что диффузионные процессы, протекающие при контакте материалов, обладающих химическим сродством, являются доминирующими в общем износе.

Те же авторы отмечают следующие характерные черты протекания диффузионных процессов в контакте «алмаз–железо».

По данным Лоладзе Т. Н. [95] стойкость алмазного резца, обусловленная диффузионным износом, существенно зависит от температуры.

Стойкость алмазного резца при резании феррита определяли по формуле [97]:

$$\tau = \frac{0.627 l^{480^\circ/T^\circ}}{C_0 V^{1/2}} \text{ с,} \quad (7.7)$$

где  $C_0$  – растворимость на границе раздела;

$V$  – скорость резания;

$T^\circ$  – температура в зоне резания.

При условии износа резца по задней поверхности  $h_3 = 1 \text{ мм}$  автор экспериментально определяет, что за период стойкости из резца продиффундирует  $0.8 \text{ мм}^3$  углерода. Пересчитав данные Т. Н. Лоладзе [97], можно получить зависимость скорости диффузии от температуры (табл. 7.3).

Доводка поверхности СТМ характеризуется также диффузионными процессами, протекающими между железосодержащей металлической связкой шлифовального круга и микронеровностями, оставшимися на поверхности поликристалла после предыдущего этапа производительной обработки.

Процесс доводки осуществляется при выключенной системе управления режущим рельефом кругов [188] и с выключенной подачей СОТС, т. е. при условии массового образования на зернах площадок износа.

**Примечание [V444]:** [a№40] Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. - М.: Машиностроение, 1982. - 320 с. {Book: Date 31/08/02 Time 14:20:01}

**Примечание [V445]:** [a№317] Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В. К теории диффузионного износа алмазного абразивного инструмента // Тр. ВНИИАШ. - 1985. - № 5. - С. 103-112. {Book: Date 31/08/02 Time 14:20:58}

**Примечание [V446]:** [a№3162] Вишневский А.С., Лысенко А.В., Пименков А.Н. О некоторых микродефектах в синтетических алмазах // Синтетические алмазы. - 1977. - Вып. 2. {Book: Date 31/08/02 Time 14:19:10}

**Примечание [V447]:** [a№3250] Лоладзе Т.Н. Износ режущего инструмента. М., Машгиз, 1958 г.-355 с. {Book: Date 30/06/02 Time 12:26:39}

**Примечание [V448]:** Стр: 279 [a№3085] Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В. Износ алмазов и алмазных кругов. - М.: Машиностроение, 1967. - 112 с. {Book: Date 01/09/02 Time 22:41:56}

**Примечание [V449]:** Стр: 279 [a№3085] Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В. Износ алмазов и алмазных кругов. - М.: Машиностроение, 1967. - 112 с. {Book: Date 01/09/02 Time 22:41:56}

**Примечание [V450]:** Стр: 279 [a№3032] Федорович В.А. Способы шлифования с комбинированным управлением режущим рельефом кругов // Вестник ХГПУ. - Харьков: ХГПУ. - 1999. Вып. 45. - С. 26-28. {Book: Date 01/09/02 Time 22:45:16}

**Примечание [V451]:** Федорович Способы шлифования

Таблица 7.3 – Скорость диффузионного износа алмазного инструмента [45]

Показатели	Температура, град. С				
	250	350	500	650	850
Скорость резания $V$ , м/с	2	2.5	3.3	5	8.4
Стойкость $T$ , с	625000	130000	24300	5000	2160
Скорость диффузионного износа $V_d \cdot 10^{-4}$ , мм <sup>3</sup> /мин	0.8	3.7	19.7	96	222

Суммарную производительность термоактивируемой доводки можно по-  
считать по зависимости:

$$Q_{\text{тд}} = Q_{\text{диф}} + Q_{\text{ок}},$$

где  $Q_{\text{тд}}$  – производительность термоактивируемой доводки;

$Q_{\text{диф}}$  – интенсивность диффузионного процесса;

$Q_{\text{ок}}$  – интенсивность термоокислительного процесса.

$$Q_{\text{диф}} = D \left( -\frac{C_0}{\sqrt{\pi D t}} e^{-\frac{x^2}{4 \pi t}} \right),$$

где  $C_0$  – концентрация углерода в связке;

$D$  – коэффициент диффузии;

$t$  – время доводки.

$$Q_{\text{ок}} = \frac{A_r \lambda}{l \rho c} \left[ \frac{\alpha E t}{(1 - \mu) \delta_s} - 1 \right],$$

где  $A_r$  – фактическая площадь контакта;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности алмаза;

$l$  – толщина нагретого приповерхностного слоя кристалла;

$\rho$  – плотность алмаза;

$c$  – удельная теплоемкость;

$\alpha$  – коэффициент термического расширения;

$E$  – модуль Юнга;

$T$  – контактная температура;

$\mu$  – коэффициент Пуассона;

$\delta_s$  – предел прочности при сжатии.

Если использовать металлическую связку на основе железа М6-14 (МЖ), то решается проблема максимально прочного удержания алмазных зерен, а главное, можно использовать присущие алмазам свойства – высокую степень химического сродства с черными металлами и, как следствие, высокую вероятность интенсивного диффузионного массопереноса из алмазных СТМ в железную связку. В нашем случае железная связка будет способствовать диффузионному съему микронеровностей с обрабатываемой поверхности СТМ.

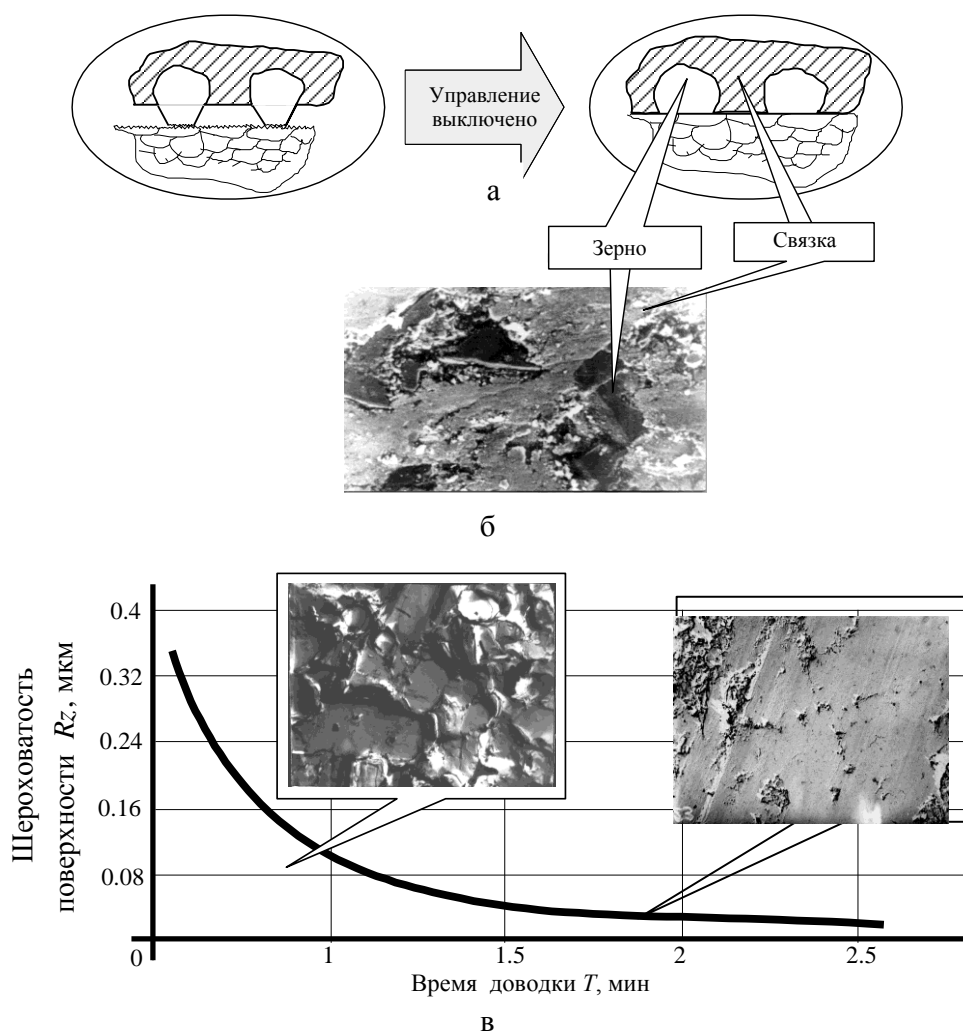


Рис. 7.10. К расчету интенсивности термоактивируемой доводки:  
 а – расчетные схемы;  
 б – рабочая поверхность круга;  
 в – зависимость шероховатости от времени доводки

Разработанная подсистема теоретического модуля экспертной системы алмазного шлифования позволяет определять условия термоактивируемой доводки лезвийных инструментов из сверхтвердых материалов на основе алмаза.

Расчеты показали, что даже при щадящих режимах термодоводки за 1–2 минуты с поверхности СТМ может быть снят объем материала, находящийся в пределах шероховатости предварительно обработанной поверхности. Объем материала, составляющего неровности предварительно обработанной поверхности СТМ, определялся методом лазерного сканирования. Наиболее объективным параметром, характеризующим шероховатость обработанной поверхности СТМ, была выбрана величина относительной опорной площади поверхности  $t_{ps}$ . Влияние продолжительности термоактивируемой доводки на величину  $t_{ps}$  приведено в табл. 7.4.

Таблица 7.4 – Влияние продолжительности термоактивируемой доводки на величину относительной опорной площади  $t_{ps}$  поверхности СТМ

Показатель шероховатости	Время доводки, с				
	20	40	60	80	100
$t_{ps}$ , % при $P = 10$ %	5.7	15.3	28.7	46.4	64.4

Доказана и реализована возможность осуществления производительной и прецизионной обработки одним и тем же кругом, в том числе и крупнозернистым, за счет целенаправленной трансформации процесса от взаимного хрупкого микроразрушения элементов системы «СТМ – связка – зерно» до термоактивируемых (диффузия, графитизация, окисление) съемов при контакте с металлической связкой. С целью интенсификации процесса термоактивируемой доводки применена металлическая связка на основе железа, которая обеспечивает максимальную прочность удержания алмазных зерен и за счет высокой степени сродства алмаза с черными металлами – высокую интенсивность диффузионного съема микронеровностей с обрабатываемой поверхности СТМ.

Таким образом, появилась возможность осуществлять предварительную (с включенной системой управления режущим рельефом круга) и прецизионную (доводочную – с выключенной системой управления режущим рельефом круга) операции обработки СТМ одним и тем же алмазным кругом на прочной металлической связке.

## 7.8. Пути повышения эффективности процесса алмазного шлифования СТМ

Особую значимость приобретает алмазное шлифование в высоких технологиях, когда только оно, обладая уникальными режущими свойствами алмазных зерен и большой размерной стойкостью кругов на прочных металлических связках, может обеспечить уровень нанотехнологий.

Однако, себестоимость процесса алмазного шлифования по сравнению с обычным абразивным существенно выше, что является основной причиной, сдерживающей широкое применение этого перспективного процесса в промышленности. Главной причиной дороговизны процесса алмазного шлифования, наряду с высокой стоимостью алмазных кругов, является чрезвычайно низкий коэффициент использования алмазных зерен.

Применение разработанной в гл. 5 методики расчета объемов разрушенных СТМ и объемов разрушенных, и выпавших из связки алмазных зерен позволило провести сравнительный анализ соотношений удельного расхода  $q$ , удельного износа  $q_{\text{и}}$  и коэффициента использования алмазных зерен  $K_{\text{и}}$  (рис. 7.11). Данная методика позволяет определить эффективное сочетание пары «марка СТМ – марка алмазного зерна» и определять коэффициент использования режущих свойств алмазных зерен.

Так, для связки М1-01 при шлифовании АСПК оптимальная марка зерна является АС32, т. к. коэффициент использования потенциальных режущих свойств алмазных зерен здесь наибольший  $K_{\text{и}} = 20 \%$  (см. рис. 7.11).

Коэффициент  $K_{\text{и}}$  является одним из главных показателей эффективности процесса алмазного шлифования. По данным Т. Н. Лоладзе и Г. В. Бокучавы, [97] при традиционных способах шлифования  $K_{\text{и}}$  не превышает 5 – 10 %. Если учесть, что минимальная стоимость алмазных зерен около 30 центов за карат, а, например, в круге 12А2 150×10×3×32 АС6 находится 58 карат алмазных зерен, т. е. стоимость алмазных зерен в нем составляет \$17.4. Таким образом, даже если коэффициент использования равен 10 %, получается, что \$1.74 эффективно используются, а \$15.66 «выбрасываем» в шлам. Исходя из вышесказанного, определение коэффициента использования потенциальных режущих свойств алмазных зерен и поиск путей его увеличения является чрезвычайно важной задачей. Особенно это важно для процессов алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов (СТМ). При обработке этих материалов удельный расход достигает значительной величины.

**Примечание [V452]:** [a№39] Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В. Износ алмазов и алмазных кругов. - М.: Машиностроение, 1967. - 113 с. {Book: Date 06/02/02 Time 19:15:05}

Коэффициент использования зерен  $K_{и} = \frac{g_{и}}{g} \cdot 100 \%$

$$K_{д} = \frac{g_{д1}}{g_{д2}} \quad \boxed{g = g_{д} + g_{в}} \quad K_{в} = \frac{g_{в1}}{g_{в2}}$$

$g_{д1}, g_{д2}$  - удельный износ за счет диспергирования зерен  
 $g_{в1}, g_{в2}$  - удельный износ за счет выпадения зерен из связи

$$K_{в}^{отн} = \frac{K_{в}}{D} \quad K_{д}^{отн} = \frac{K_{д}}{D} \quad D = \frac{A_2}{A_1}$$

$D$  - изменение входного показателя  
 $A_1, A_2$  - показатели процесса

Повышение эффективности за счет алмазодержания

Параметр	Алмазодержание (прочность, анжн)	Зернистость $D=4$	Концентрация $D=1/8$	$h_{св}$ $D=2$
$K_{в}$	3	6	2	1.2
$K_{в}^{отн}$	2.6	4	1.7	1.13

за счет разрушения зерен

Параметр	Повышение динамической прочности зерен $D=5$	$K_{с}$ $D=2.5$	Ориентация зерна $\{100\} \rightarrow \{111\}$ $D=10$	$V_{кр}$ $D=3$
$K_{д}$	6	3	12	1.4
$K_{д}^{отн}$	5.3	2.0	7	2.0

Рабочая высота $h_{кр} = a l_3$ , где $a$									
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7				
$K_{и}, \%$	60	50	40	30	20				

Концентрация $K, \%$										
	5	10	15	20	25	50	100	150	200	250
$K_{и}, \%$	30	25	20	17	15	13	10	8	3	2

Связка										
	МВ 1	ПМ12	МО13	М 1	МК	М 15	МС 1	М 3	МЖ	МО 3
$K_{и}, \%$	6	10	15	20	25	25	28	35	40	43

Марка зерна									
	АС 2	АС 6	АС 15	АС 32	АС 50	АС 82	АС 100	АС 160 Т	
$K_{и}, \%$	8	15	18	22	25	30	35	50	

Зернистость										
	50/40	63/50	80/63	100/80	125/100	160/125	200/160	250/200	315/250	400/315
$K_{и}, \%$	30	28	28	25	23	18	15	12	8	5

Рис. 7.11. Пути повышения эффективности использования алмазных зерен

Наша методика определения  $q_{\text{и}}$  основана на особенностях шлифования СТМ кругами на металлических связках [190]. Способ оценки влияния материала связки на износ основан на его разделении на составляющие части за счет диспергирования активных зерен  $q_{\text{д}}$  и за счет разрушения связки  $q_{\text{в}}$  пропорционально соответствующим вероятностям  $P_{\text{д}}$  и  $P_{\text{в}}$ :

$$\frac{q_{\text{д}}}{q_{\text{в}}} = \frac{P_{\text{д}}}{P_{\text{в}}} = \varepsilon - 1. \quad (7.8)$$

Следовательно, по экспериментальным значениям  $\varepsilon$  и  $q$ , зная, что  $q = q_{\text{д}} + q_{\text{в}}$ , и используя эту зависимость, можно количественно в первом приближении оценить вклад материала связки в износ круга, что позволяет управлять или прогнозировать его.

Существенным достоинством управляемого процесса шлифования является то, что в нем при работе с  $h_{\text{р}} = h_{\text{св}}$  исключается выпадение из связки неработавших зерен.

Если осуществлять управляемый процесс шлифования с оптимальной рабочей высотой зерен  $h_{\text{р}}$ , равной максимальной величине микронеровностей связки  $h_{\text{св}}$ , что обеспечивает максимальное использование свойств алмазных зерен и практически исключает контакт связки с обрабатываемым СТМ, то согласно схеме на рис. 7.6 процесс износа РПК адекватен перемещению плоскостей I–I и II–II синхронно вниз, что соответствует износу зерен (I–I) и принудительному удалению связки (II–II).

Объем диспергированной части зерен будет пропорциональным величине  $h_{\text{д}}$  (см. рис. 7.6). Тогда:

$$h_{\text{д}} = d_3 - (h_{\text{св}} + h_{\text{кр}}); \quad (7.9)$$

$$q_{\text{д}} = f[d_3 - (h_{\text{д}} + h_{\text{кр}})]^3, \quad (7.10)$$

а объем выпавшей части зерен будет пропорционален величине  $h_{\text{в}}$

$$h_{\text{в}} = h_{\text{св}} + h_{\text{кр}}; \quad (7.11)$$

$$q_{\text{в}} = f(h_{\text{св}} + h_{\text{кр}})^3; \quad (7.12)$$

$$q = q_{\text{в}} + q_{\text{д}}. \quad (7.13)$$

**Примечание [V453]:** [a№3081]  
Федорович В.А. Удельный расход и  
удельный износ алмазных зерен при  
шлифовании СТМ.// Резание и инстру-  
мент в технологических системах. -  
Харьков:ХГПУ, 1999. - Вып 54. - С.230-  
233. {Book: Date 06/02/02 Time 19:33:36}

Коэффициент использования алмазных зерен  $K_{\text{и}}$  приближенно можно определить:

$$K_{\text{и}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{(d_3 - h_{\text{кр}} - h_{\text{св}})^3}{(h_{\text{кр}} + h_{\text{св}})^3}. \quad (7.14)$$

Удельный износ алмазных зерен пропорционален величине линейного износа круга  $\Delta h = h_{\text{д}}$ .

$$d_3 = h_{\text{д}} + h_{\text{св}} + h_{\text{кр}}. \quad (7.15)$$

Величину микронеровностей связки  $h_{\text{св}}$  определяем методом лазерного сканирования поверхности круга из металлической связки без алмазных зерен. Критическую величину заделки зерен в связку  $h_{\text{кр}}$  определяли методом 3D моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «СТМ – зерно – связка» с использованием пакета прикладных программ по методу конечных элементов.

На основании анализа расчетной схемы определяются способы сокращения различных частей износа зерен за счет их диспергирования  $q_{\text{д}}$  и выпадания зерен из связки  $q_{\text{в}}$ , которые оцениваются по их эффективности величиной коэффициента  $K_{\text{д}}$  и  $K_{\text{в}}$  (см. рис. 7.11).

Эффективность способа оцениваем по относительному изменению безразмерных параметров  $K_{\text{д}}^{\text{отн}}$  и  $K_{\text{в}}^{\text{отн}}$  с учетом значения интервала изменения параметра  $D$ . Процесс ультразвукового шлифования с поперечной амплитудой колебаний и одновременным дозируемым удалением связки обеспечивает существенное увеличение коэффициента использования потенциальных режущих свойств зерен.

В данном случае реализуется процесс, аналогичный ультразвуковому шаржированию чугуна [82, 8], т. е. идет непрерывное заглубление работающих алмазных зерен и одновременное введение в работу новых зерен (за счет удаления связки).

Экспериментально изучена роль марки алмазных зерен и связки круга, физико-механических свойств обрабатываемого СТМ, в том числе и свойств анизотропии.

**Примечание [V454]:** [a№3245]  
Кисилев М.Г., Минченя В.Т. Применение  
ультразвука для формирования алмаз-  
носного слоя на рабочей поверхности  
ограниченных дисков //Инструментальный  
світ.-2002.-№ 1(13).-С.30-31. {Book: Date  
04/07/02 Time 01:23:22}



Увеличение рабочей высоты зерен  $h_p$  даже при неизменной величине  $h_{кр}$  (она должна увеличиваться вследствие уменьшения числа зерен в контакте  $N_k$  и возрастания нагрузки на них) приводит к уменьшению эффективно диспергированной части зерен  $h_d$ . Таким образом, управляемый процесс следует осуществлять с минимальной рабочей высотой  $h_p$ , ограниченной только высотой микронеровностей связки  $h_{св}$ , т. е.  $h_p = h_{св}$ . Это положение подтверждается также исследованиями В. Н. Чачина и В. Д. Дорофеева [201] по профилированию алмазных кругов, где показано, что с уменьшением вылета зерен из связки снижается вероятность их макроразрушения, т. е. в нашем случае уменьшается расход алмазных зерен и повышается коэффициент их использования.

Величину микронеровностей связки  $h_{св}$  определяем экспериментально после ее электрохимического или электроэрозионного удаления в круге без зерен методом лазерного сканирования.

Таким образом, для различных условий можно определить оптимальную рабочую высоту зерен  $h_p$ , а, следовательно, и число их в контакте для различных концентраций.

Повышение коэффициента использования свойств алмазных зерен следует проводить за счет:

- применения кругов с пониженной концентрацией алмазных зерен и осуществления процесса шлифования с минимальной рабочей высотой их выступания из связки;
- применения максимально прочных связок, прочно и долго удерживающих алмазные зерна и принудительно удаляемых (например, электромеханическим или электроэрозионным способом) со скоростью, равной скорости линейного износа зерен;
- обеспечения принудительного микроразрушения вершин алмазных зерен для исключения образования на них тормозящих площадок износа (для производительного шлифования) и исключения периодичности процесса съема материала;
- использования эффекта виброударного заглубления алмазных зерен в связку для продления периода их активной жизни (по аналогии с ультразвуковым шаржированием [8]);

**Примечание [V455]:** [a№956] Чачин В.Н., Дорофеев В.Д. Прочность закрепления алмазного зерна в связке шлифовального круга // Вестн АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. - Минск, 1972. - № 1. с. 73-76. {Book: Date 24/08/02 Time 20:20:06}

**Примечание [V456]:** [a№3165] Способ шаржирования поверхностей: А.с. 982872 СССР, МКИ В 24 В 1/00. / Л.А. Сагарда, В.В. Маковецкий; Опубл. 1982, Бюл. № 47. {Book: Date 24/08/02 Time 21:09:26}

- металлизации и других покрытий на зернах, повышающих прочность удержания зерен в связке;
- селективной сортировки зерен по прочности и форме до закладки их в круг.

Перспективным на наш взгляд может быть и использование в качестве абразива дробленых двухслойных алмазных пластин (ДАП). Если продукты дробления разместить (сориентировать) в магнитном поле алмазной стороной к РПК, то в качестве «выбрасываемой» части такого зерна будет металлическая подложка (которая, кстати, будет иметь хорошее удержание в металлической связке).

Основные тенденции повышения эффективности управляемого алмазного шлифования приведены на рис. 7.12.

Все это можно реализовать в предложенных способах шлифования с комбинированным управлением режущим рельефом круга.

Анализ полученных результатов показывает, что наиболее эффективный путь повышения  $K_{\text{и}}$  зерен – это повышение свойств алмазоудержания связки вплоть до твердосплавных, применение которых возможно только в разработанных нами способах шлифования с комбинированным управлением параметрами РПК [188].

**Примечание [V457]:** [a№3032]  
Федорович В.А. Способы шлифования с комбинированным управлением режущим рельефом кругов. Вестник ХГПУ, Харьков. вып.45, с.26-28. {Book: Date 06/02/02 Time 19:48:21 }

Параметры условий шлифования		Показатель процесса шлифования				
Параметр	$\frac{X_{\min}}{X_{\max}}$	Производительность обработки $Q$	Удельный расход $q$	Коэффициент использования зерен, $K$	Качество обработанной поверхности, $t_{ps}$	Процент выхода годных изделий
Фактическая площадь контакта	$\frac{0.03}{80}$					
Модуль упругости связки	$\frac{70}{200}$					
Концентрация $K$	$\frac{15}{200}$					
Динамическая прочность зерен	$\frac{10}{150}$					
Частота ультразвуковых колебаний	$\frac{12}{30}$					
Зернистость	$\frac{50/40}{630/500}$					

Рис. 7.12. Основные тенденции влияния условий шлифования на выходные показатели управляемого процесса алмазного шлифования СТМ

### Выводы

Разработана методология управления процессом приспособляемости и способы шлифования с комбинированным управлением выходными показателями процесса алмазного шлифования СТМ. Процесс управления приспособляемостью основан на принудительном регулировании величины фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ» путем одновременного дозируемого удаления связки (макроуровень) и принудительного формирования субмикрорельефа на алмазных зернах введением в зону шлифования и/или управления энергии ультразвуковых колебаний (микроуровень).

Разработанные способы ультразвукового алмазного шлифования СТМ с адаптивным комбинированным управлением параметрами РПК, позволяют за счет устранения периодичности процесса в 1.4 – 1.6 раза повысить производительность, улучшить качество обработки и на 20 – 30 % сократить брак при заточке инструмента, снизить себестоимость обработки за счет повышения коэффициента использования потенциальных свойств алмазных зерен. (а.с. 1085146, 1519017). Основным достоинством разработанных способов шлифования является повышение коэффициента использования дорогостоящих алмазных зерен за счет выбора оптимальной рабочей высоты выступления их из связки, согласованной с минимальной концентрацией, принудительного заглубления их в связку и формирования на них режущего субмикрорельефа в зоне управления, использования максимально прочных металлических связок. Разработан и реализован алгоритм определения условий бездефектного производительного и прецизионного шлифования, основанный на выборе оптимальной нагрузки на единичное алмазное зерно.

Для повышения производительности алмазного шлифования СТМ и снижения периодической составляющей процесса приспособляемости предложен способ формирования на площадках износа зерен субмикрорельефа путем воздействия на них сверхтвердыми инденторами-зернами в диапазоне ультразвуковых колебаний. Эффективность формирования субмикрорельефа на площадках износа зерен при ультразвуковом воздействии инструментом-ударником определяется физико-механическими свойствами и размерами зерен круга и ударника. Зернистость ударника должна быть в 2–3 раза меньше чем у шлифовального круга, марка зерна максимально прочная (АС160Т, коэффициент трещиностойкости  $K_{IC} \geq 10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ). Это позволяет на 10 – 50 % увели-

чить коэффициент использования потенциальных свойств алмазных зерен и практически исключить периодичность процесса приспособляемости.

Разработаны алгоритмы определения оптимальных условий производительного и/или прецизионного шлифования СТМ. Алгоритмы основаны на установлении соответствующей нагрузки на единичное зерно путем комплексного управления микрорельефом РПК (удаление связки) или субмикрорельефом на площадках износа алмазных зерен (ультразвуковое воздействие алмазными инденторами-зернами). Такой подход обеспечивает оптимальное сочетание процессов микроразрушения (самозатачивание) и/или истирания (термоактивируемый износ).

Выполненная модернизация оборудования обеспечивает осуществление процесса ультразвукового алмазного шлифования с адаптивным комбинированным управлением параметрами РПК за счет дозируемого целенаправленного удаления связки и принудительного формирования режущего субмикрорельефа на алмазных зернах. Разработанная методика оценки уровня приспособляемости при алмазном шлифовании СТМ, основанная на использовании электризации трущихся алмазных пар, применена для адаптивной системы управления параметрами РПК. Она позволяет стабилизировать процесс шлифования во всем диапазоне приспособляемости. Разработаны устройства для реализации комбинированного управления параметрами макро- и микрорельефа РПК при шлифовании (а.с. 103975, 1009685, 1103976). Предложен состав и структура абразивного слоя алмазного круга для управляемого процесса шлифования (а.с. 1148761). Металлическая связка на основе железа позволяет реализовать термодоводочный процесс прецизионной обработки режущих элементов лезвийного инструмента из СТМ.

Разработанные способы ультразвукового алмазного шлифования с адаптивным комбинированным управлением РПК могут быть использованы в процессах шлифования кругами на металлических связках с другими абразивными материалами (нитрид бора, карбид кремния и др.), что при обработке определенных групп материалов позволит существенно снизить себестоимость и повысить точность обработки.

## Глава 8

# Разработка экспертной системы процесса алмазного шлифования СТМ

Глава посвящена разработке экспертной системы процесса алмазного шлифования СТМ. Система состоит из двух взаимосвязанных модулей – теоретического и экспериментального, которые решают как самостоятельные задачи, так и дополняют друг друга.

Теоретический модуль экспертной системы базируется на аналитическом описании процессов взаимного микроразрушения элементов 3D системы «СТМ – зерно – связка» в различных условиях их взаимодействия. Он позволяет в компьютерном режиме прогнозировать количественные выходные показатели процесса и область оптимальных условий обработки СТМ различных марок, в том числе и вновь создаваемых. Достоинством этого модуля экспертной системы является возможность без длительных, трудоемких и дорогостоящих экспериментов анализировать широкий спектр взаимосвязанных факторов, влияющих на эффективность функционирования единой системы «СТМ – зерно – связка» в процессе шлифования.

Экспериментальный модуль экспертной системы создан на базе компьютерной обработки широкой гаммы экспериментальных исследований процесса алмазного шлифования различных марок СТМ и позволяет определять оптимальные условия при конкретных ограничивающих факторах, т. е. при определенных реальных возможностях производства.

## 8.1. Методология разработки экспертной системы процесса шлифования

Экспертная система – это компьютерная программа, использующая экспертные знания для обеспечения высокоэффективного решения задач в узкой предметной области [184]. При создании экспертной системы использована процедурная база знаний, т. е. в качестве инженера знаний и предметного эксперта выступает автор работы.

**Примечание [V458]:** [a№3252]  
Уотермен Д. Руководство по экспертным  
системам: Пер.с англ. - М.: Мир, 1989. -  
369 с.\* Дубликат a№ 1111  
{}Book: Date 07/07/02 Time 19:55:11 {}

В экспертной системе используется как база данных, так и база знаний в предметной области алмазно-абразивной обработки и лезвийной обработки инструментом из СТМ. База данных содержит справочные данные о характеристиках алмазных кругов (связка, марки зерен, концентрация, зернистость и т. д.), физико-механических свойствах различных марок алмазных зерен и обрабатываемых СТМ. Экспертная система разработана на основе процедурной базы знаний. База знаний оперирует такими понятиями, как надежность лезвийного инструмента из СТМ, брак при его заточке, весовой вклад различных факторов в эффективность процесса обработки и построена по предложенному алгоритму определения оптимальных условий микроразрушения элементов системы «СТМ – зерно – связка», основанному на обеспечении нагрузки на единичное зерно. В качестве языка программирования использован Borland Delphi 5. В состав экспертной системы входит программный комплекс по методу конечных элементов (МКЭ) типа Cosmos и Ansys.

Основное назначение экспертной системы – прогнозирование уровня выходных показателей при шлифовании различных марок СТМ, в том числе и вновь создаваемых, и оптимизация процесса обработки.

На отдельных этапах работы экспертная система предусматривает участие эксперта. Эксперт обладает знаниями процесса и путей воздействия на его эффективность.

Структурно-логическая схема алгоритма экспертной системы представлена на рис. 8.1.

Согласно схеме экспертная система состоит из нескольких взаимосвязанных между собой модулей и подсистем, каждый из которых решает свою конкретную задачу. Работа экспертной системы базируется на результатах исследований, проведенных в предыдущих главах.

После ввода в экспертную систему исходных данных – физико-механических свойств СТМ, зерен и связки, нормального давления или попеременной подачи, скорости шлифования, зернистости и концентрации алмазных зерен, параметров рабочей поверхности круга (которыми можно управлять в процессе шлифования [32]), производится предварительная проверка обеспечения бездефектности процесса обработки. Для этого выполняется расчет 3D НДС системы «связка – кристаллит – металлофаза – зерно». На этом этапе 3D моделирование НДС системы «СТМ – зерно – связка» анализируется уровень термодинамических напряжений и/или энергии деформации в поликристалле и проверяется, не превышают ли они критических значений.

**Примечание [V459]:** [a№3006]  
Грабченко А. И. Научные основы алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов: Диссертация в форме научного доклада докт. техн. наук: 05.03.01. - Харьков, 1995. - 59 с. - {Book: Date 16/02/02 Time 22:10:34}

Аналитически подобная задача решена Новиковым Н. В. [122] применительно к разрушению композиционных сверхтвердых материалов, однако без учета силового фактора.

**Примечание [V460]:** [a№3057]  
Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н. Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов. - Киев: Наук. думка, 1993. - 220 с. {Book: Date 13/02/02 Time 00:14:53}

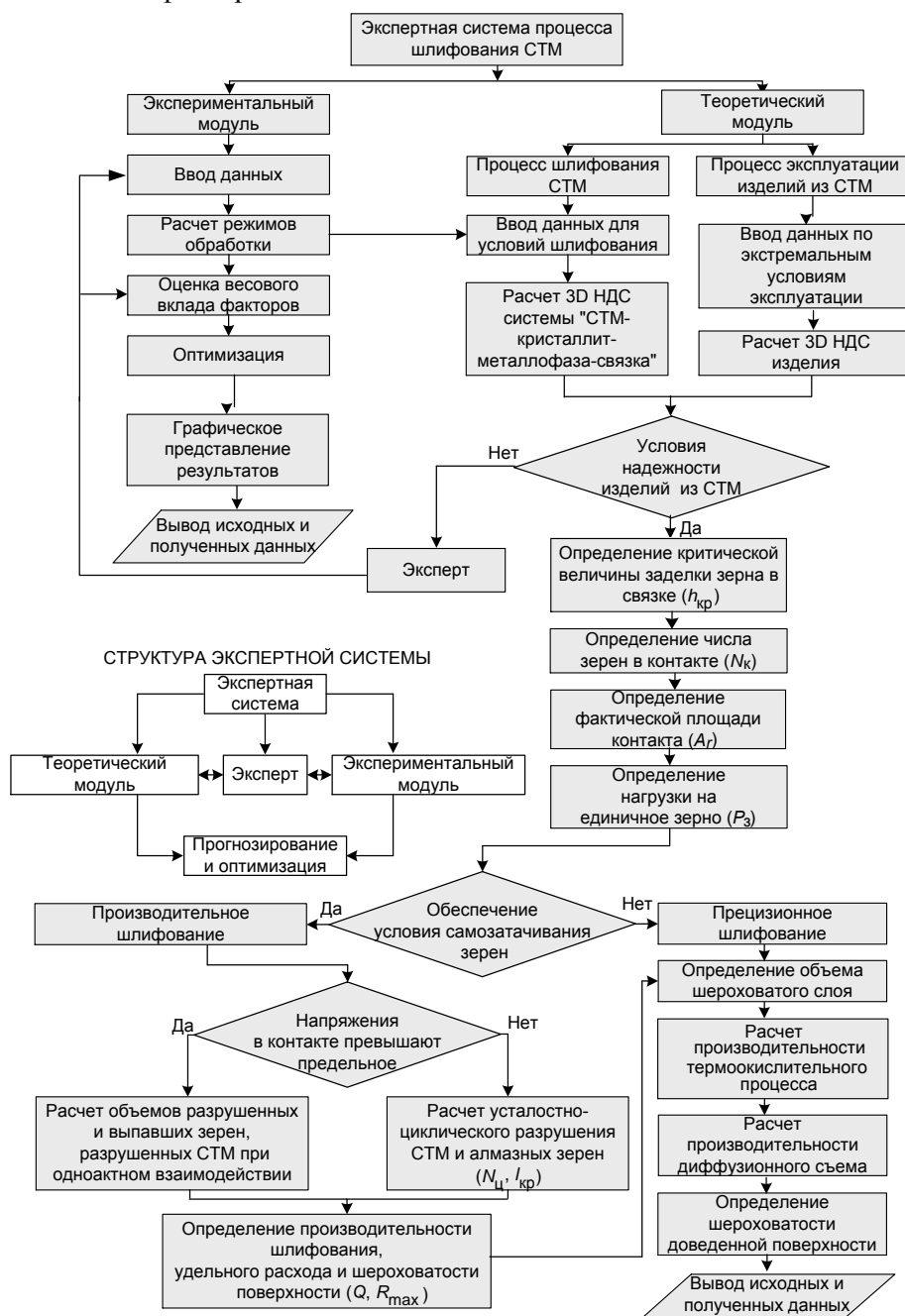


Рис. 8.1. Структурно-логическая схема экспертной системы процесса шлифования

Если условия эксплуатации изделия из СТМ известны (например, лезвийный инструмент), то расчет 3D НДС, например, режущего клина лезвийного инструмента осуществляется в экстремальных условиях его эксплуатации для обеспечения его надежности еще на стадии изготовления.

В теоретический модуль входят подсистемы: определения критической величины заделки зерен в связку, их заглубления в нее (методом 3D НДС); определения числа работающих зерен; определения относительной величины фактической площади контакта в системе «РПК – СТМ»; определения нагрузки на единичное зерно. Если нагрузка на зерно достаточна для обеспечения его самозатачивания (микроразрушения), реализуется производительный процесс, если нет – прецизионный, где ответственными за съем припуска являются термоактивируемые процессы. Расчет объемов разрушенных СТМ и алмазных зерен ведется двумя способами. Если нагрузки в контакте «зерно – СТМ» достаточны для их микроразрушения при одноактном взаимодействии, расчет ведется по методу конечных элементов (см. пп. 5.4, 5.5), если нагрузка не достаточна, решается усталостно-циклическая контактная задача (см. п. 5.9). В производительном шлифовании процесс микроразрушения СТМ и зерен может осуществляться при одноактном (за один контакт) взаимодействии зерна с поликристаллом либо в режиме усталостно-циклического микроразрушения. В первом случае объемы разрушенного СТМ и зерен определяются при 3D моделировании НДС системы по величине закритических приведенных напряжений и/или энергии деформации в отдельных элементах. По этим результатам расчета оценивается производительность съема припуска, удельный расход и износ алмазных зерен.

В случае необходимости расчета процесса термоактивируемой доводки (прецизионной обработки) – решение принимает эксперт. Последовательность работы подсистем включает: расчет интенсивности термоокислительного и диффузионного съема шероховатого поверхностного слоя СТМ, при термосиловом взаимодействии с железосодержащей металлической связкой, полученного после предварительной обработки СТМ; определение производительности и времени необходимого для съема объема материала, находящегося в слое, по толщине соответствующем максимальной шероховатости предварительно обработанной поверхности (определяется методом лазерного сканирования).

В случае обработки нового сверхтвердого материала (экспериментальные данные отсутствуют) исходные данные вводятся непосредственно в тео-



ретический модуль, а полученные в результате его работы выходные показатели процесса алмазного шлифования или доводки новых СТМ могут быть скорректированы с использованием экспериментального модуля.

Теоретический модуль экспертной системы позволяет без проведения дорогостоящих и трудоемких экспериментов количественно оценивать производительность шлифования, удельный износ, шероховатость обработанной поверхности в зависимости от марки СТМ, марки зерна, зернистости и концентрации, нормального давления, нагрузки на единичное зерно, скорости шлифования, фактической площади контакта, относительной опорной площади РПК. Поскольку процесс алмазного шлифования осуществляется с комбинированным управлением параметрами РПК, основанном на дозируемом удалении связки и принудительном формировании на алмазных зернах режущего субмикрорельефа, следует определить параметры управления (подсистема разработана в гл. 7). При назначении технологических параметров принудительного формирования субмикрорельефа на площадках износа зерен при ультразвуковом воздействии инструментом-ударником учитывается марка зерен и зернистость РПК и ударника, а также их связка. Концентрация алмазов в ударнике определяется физико-механическими свойствами и размерами зерен РПК и ударника. Зернистость ударника должна быть в 2 – 3 раза меньше зернистости РПК, марка зерна максимально прочная ( $AC160T$ ,  $K_{IC} \geq 10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ).

Экспериментальный модуль экспертной системы на базе компьютерной обработки широкой гаммы экспериментальных исследований позволяет с участием и/или без эксперта определить оптимальные условия процесса алмазного шлифования различных СТМ при конкретных ограничивающих факторах, т. е. при определенных реальных возможностях производства. Методом регрессионного анализа определен весовой вклад различных входных параметров процесса обработки, что позволяет системе принимать решение без участия эксперта.

Порядок работы экспертной системы в общем случае при различных вариантах ее использования определяет следующую последовательность действия пользователя (см. рис. 8.1):

- Если по обрабатываемому СТМ есть результаты экспериментальных исследований, вводим исходные данные в экспериментальный модуль экс-

пертной системы, получаем оптимальные условия (режимы) обработки данной марки СТМ.

- В случае если изделие из СТМ – лезвийный инструмент, то в теоретический модуль вводятся данные по экстремальным условиям его конкретной эксплуатации. Для этих условий (сила резания, температура) ведется расчет 3D термосиловых НДС режущего клина. Затем решается обратная задача для 3D термосиловых НДС системы «кристаллит СТМ – металлофаза – зерно – связка» и определяются условия нагружения этой системы (силы и температуры), при которых в процессе заточки инструмента эти напряжения будут несколько превышать эксплуатационные.

- Если полученные режимы алмазного шлифования или термоактивируемой доводки в экспериментальной экспертной системе вызывают брак при обработке, выдается команда «изменить режимы»; на этом этапе эксперт принимает решение, какие входные данные следует изменить. При условии выполнения данного требования (которое обеспечивает надежность лезвийного инструмента из СТМ уже на стадии его изготовления) продолжается расчет по теоретическому модулю.

- Если приведенные термосиловые напряжения или/и энергия деформации превышают предел прочности СТМ, возникает большая вероятность образования на обработанной поверхности сетки микротрещин, т. е. брака, например, при заточке лезвийного инструмента. В этом случае следует вернуться в блок 2 и изменить исходные данные, например, уменьшить величину поперечной подачи или интенсифицировать процесс управления параметрами РПК [188]. Если дефекты не образуются, то по той же методике в пакете для метода конечных элементов путем расчета приведенных напряжений в контакте «зерно – связка» определяем критическую величину заделки зерен в связке при выбранных исходных данных (блок 4). Зная критическую величину заделки зерен в связке, используя теоретические зависимости, полученные нами [192] и в гл. 5 и скорректированные экспериментальным поправочным коэффициентом, полученным при изучении параметров 3D топографии поверхности РПК и СТМ путем лазерного сканирования, определяем число зерен в контакте и величину фактической площади контакта. Для этой цели применена также разработанная В. Л. Доброскоком система 3D моделирования рабочей поверхности круга [53]. Используя полученные результаты, определяем нагрузку на единичное алмазное зерно. Если нагрузка на зерно достаточна для его микроразрушения (самозатачивания) или процесс форми-

**Примечание [V461]:** [a№3032]  
Федорович В.А. Способы шлифования с комбинированным управлением режущим рельефом кругов // Вестник ХГПУ, Вып. 45. - Харьков: ХГПУ. - 1999. - С. 26-28. {Book: Date 13/02/02 Time 00:29:39}

**Примечание [V462]:** [a№3058]  
Федорович В.А., Гринько С.А., Определение фактической площади контакта РПК с обрабатываемым СТМ // Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць ХДПУ. - Харків: ХДПУ. - 2000. Вип. 1(3). - С.266-272. {Book: Date 13/02/02 Time 00:31:07}

**Примечание [V463]:** [a№3130]  
Доброскок В.Л. Научные основы формирования рабочей поверхности кругов на токопроводящих связках в процессе шлифования: Дис...докт. техн. наук: 05.03.01 - Харьков, 2001. - 447 с. {Book: Date 26/08/02 Time 12:03:46}

рования на зернах режущего субмикрорельефа осуществляется целенаправленно путем наложения ультразвуковых колебаний [191], (определяет эксперт), то дальнейшие расчеты осуществляются по ветви «производительное шлифование». При этом процесс производительного шлифования анализируется в два этапа. На первом – методом 3D моделирования НДС системы «СТМ – зерно – связка» по методу конечных элементов определяются элементы, в которых либо приведенные напряжения, либо энергия деформации превысили критические для СТМ и зерен значения, предопределив их разрушение. На втором – решается усталостно-циклическая задача микроразрушения элементов системы «зерно – СТМ».

## 8.2. Разработка теоретического модуля экспертной системы

Сложность процессов, протекающих в зоне шлифования и в зоне управления, их взаимовлияние обуславливают значительную трудоемкость, а иногда и невозможность всесторонних экспериментальных исследований. Для определения области оптимальных условий эффективного функционирования технической системы «СТМ – зерно – связка» целесообразно изучать ее на разработанных моделях. Аналитическое описание процесса разрушения алмазных зерен и СТМ при шлифовании с комбинированным управлением режущим рельефом круга позволяет без трудоемких и дорогостоящих экспериментов определять область оптимальных условий шлифования и управления при обработке различных СТМ, в том числе вновь создаваемых.

Поэтому целесообразна разработка теоретического модуля экспертной системы шлифования, который был бы основан на теоретико-экспериментальных данных о процессах разрушения элементов единой системы «СТМ – зерно – связка» в условиях, максимально приближенных к реальным. Именно совокупность механизмов и видов взаимного микроразрушения элементов этой единой системы полностью определяют эффективность алмазного шлифования СТМ.

В теоретическом модуле сделана попытка увязать в единую систему расчет взаимосвязанных составляющих видов разрушения элементов системы «СТМ – зерно – связка» (см. рис. 5.1). Такая попытка объединить все виды разрушения единой системы сделана впервые и представляет собой сложную задачу. При ее решении использованы большие возможности современ-

**Примечание [V464]:** [a№3088]  
Федорович В.А. Управление параметрами субмикрорельефа алмазных зерен при шлифовании сверхтвердых материалов // Високі технології в машинобудуванні 36. наук. праць НТУ "ХПІ". - Харків. - 2001. Вип. 1(4). - С. 50-54. {Book: Date 13/02/02 Time 00:37:17}

**Примечание [V465]:** Вставлено

ных прикладных компьютерных программ для метода конечных элементов и возможности современных ЭВМ, теоретические разработки Н. В. Новикова, Л. Н. Девина, А. Л. Майстренко, Т. Н. Лоладзе, Г. В. Бокучавы, Л. Л. Мишнаевского, выполненные в области разрушения и износа сверхтвердых материалов.

Теоретический модуль базируется на 3D моделировании напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «РПК – СТМ». В него входят следующие подсистемы: определения числа работающих зерен и фактической площади контакта; определения критической величины заделки алмазных зерен в связке, величины их заглубления в связку, объемов разрушенных СТМ и алмазных зерен; определения условий бездефектной обработки; расчета 3D НДС режущего клина лезвийного инструмента из СТМ в экстремальных условиях его эксплуатации для обеспечения надежности еще на стадии его изготовления; расчета процесса усталостно-циклического разрушения СТМ и алмазных зерен для определения производительности и удельного расхода; расчета производительности термоактивируемой доводки.

Разработанный на основе процедурной базы знаний и банка данных теоретический модуль экспертной системы позволяет прогнозировать область оптимальных условий обработки и количественно оценивать производительность шлифования, удельный износ и расход алмазных зерен, шероховатость обработанной поверхности различных марок СТМ в зависимости от марки зерна, зернистости, концентрации, нормального давления, скорости шлифования, фактической площади контакта и относительной опорной площади профиля РПК. Достоинством данной экспертной системы является возможность без длительных, трудоемких и дорогостоящих экспериментов анализировать широкий спектр влияния взаимосвязанных факторов на эффективность функционирования единой системы «СТМ – зерно – связка» в процессе шлифования.

### **8.2.1. Методология определения оптимальных характеристик алмазных кругов**

Эффективность процесса алмазного шлифования определяется качеством и характеристиками алмазных кругов и правильностью выбора условий шлифования. Первое условие в большой степени обеспечивается на стадии изготовления алмазных кругов, второе – на стадии их эксплуатации.

В процессе шлифования высокотвердых материалов определяющим может являться соотношение прочностей элементов системы «обрабатываемый материал–алмазное зерно–связка круга». Например, при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов (СТМ), когда твердости ИМ и ОМ практически одинаковы, эффективность процесса полностью определяется оптимальностью выбора соотношения прочностей СТМ, алмазных зерен и связки круга [1].

В настоящее время в Украине существует несколько сотен марок связок, применяемых в алмазных кругах. Эти связки существенно различаются по своим прочностным свойствам. Например, только металлические связки имеют довольно широкий диапазон прочности – от алюминиевых до твердосплавных. Таким же широким прочностным диапазоном характеризуются прочностные свойства алмазных шлифпорошков от АС2 до АС160Т, различающихся по прочности в сотни раз.

Однако в настоящее время отсутствует методология выбора оптимального сочетания прочностных свойств алмазных зерен и металлической связки применительно к обработке конкретного обрабатываемого материала.

Существующие в литературе рекомендации по применению тех или иных алмазных зерен и металлических связок носят общий характер и имеют большие диапазоны. Такие рекомендации, с учетом высокой стоимости алмазных зерен (различающейся в зависимости от марки зерна в сотни раз), приводят к низкой эффективности их использования и, как следствие, – высокой себестоимости процесса алмазного шлифования, что существенно сдерживает его применение в процессах обработки. К нерациональному использованию алмазных зерен приводит также не всегда обоснованное назначение уровня их концентрации в алмазных кругах. Традиционно применяемая в серийно выпускаемых кругах концентрация алмазных зерен (25, 50, 100, 150, 200 %) требует существенного уточнения. Для обработки конкретного обрабатываемого материала должны быть выбраны конкретные по прочности (и цене) алмазные зерна, они должны быть заложены в определенную, по своим прочностным свойствам, связку, и их концентрация в круге должна быть строго определенной. При этом с целью экономии алмазных зерен их концентрация не должна ограничиваться серийно выпускаемой. При этом должна решаться также задача оптимального сочетания прочностных

**Примечание [V466]:** Стр: 299  
[a№3232] Grabchenko A.I, Fedorovich V.A., Rusanov V.V. 3D simulation of stress-deformed state of grinding zone of superhard materials.// Труды Междунар. конф. " International Scientific Conference (MicroCAD -2002), March 7- 8, Miskolc, Hungary - 2002. - С.95-98. {Book: Date 30/07/03 Time 12:10:31}

**Примечание [V467]:** Стр: 299  
Уточнить

свойств металлической связки и алмазных зерен с точки зрения сохранения их целостности в процессе спекания алмазных кругов.

Методология решения данной проблемы базируется на 3D моделировании напряженно-деформированного состояния зоны шлифования и анализе процессов разрушения, происходящих в этой зоне в зависимости от прочностных свойств алмазных зерен, связки и обрабатываемого материала.

С использованием разработанной методологии 3D моделирования НДС проведены исследования процесса спекания алмазных кругов на металлических связках и зоны шлифования различных труднообрабатываемых материалов с целью определения оптимального сочетания прочностных свойств алмазных зерен, обрабатываемого материала и металлической связки как на стадии изготовления алмазных кругов, так и на стадии их эксплуатации (рис. 8.2).



Рис. 8.2. Последовательность определения оптимального сочетания прочностных свойств обрабатываемого материала, металлической связки, алмазных зерен и их концентрации

Задачей процесса 3D моделирования НДС зоны спекания алмазосодержащего слоя круга на металлической связке является определение оптимального сочетания прочностных свойств алмазных зерен и связки, при которых обеспечивается сохранение целостности алмазных зерен в процессе спекания алмазного круга.

Вопреки существующим представлениям о модели алмазосодержащего слоя кругов как совершенной [14], нами установлено, что структура этого слоя кругов содержит исходную дефектность в виде поврежденных алмазных зерен, которая количественно определяется безразмерной величиной степени повреждения алмазных зерен [25].

Гранулометрический анализ зерен синтетических алмазов AC50 400/315, извлеченных рекуперацией из образца твесала, показал, что в процессе спекания остаются неразрушенными только около 10–20 % зерен. При этом показано, что на степень повреждаемости алмазных зерен в процессе спекания КАМ существенное влияние оказывает концентрация в них алмазных зерен. Так, увеличение концентрации с 50 до 150 % повышает повреждаемость алмазных зерен в процессе спекания в 2.8 раза.

Поскольку технология спекания алмазосодержащего слоя круга, например, на твердосплавной связке типа ВК, практически идентична с технологией спекания композиционных алмазных материалов (КАМ), естественно предположить, что и при спекании алмазных кругов часть зерен разрушается. Показано, что в процессе спекания алмазных кругов процент основной фракции (крупных зерен) уменьшается на 20–30 % [17].

Причем, алмазные зерна различной прочности, очевидно, будут подвергаться разрушению в процессе спекания по-разному. Состав металлической связки и, как следствие, технологические параметры спекания кругов будут существенно сказываться на степени повреждаемости алмазных зерен.

При 3D моделировании процесса спекания фрагмент алмазосодержащего слоя круга моделировался кубом с размерами 300×300×300 мкм, с помещенным в центре алмазным зерном в форме октаэдра с размерами 100×100 мкм, что соответствует 100 % концентрации алмазного круга. При моделировании круга с 50 % концентрацией алмазных зерен размер куба увеличивался в два раза и т. д.

Металлофаза в алмазном зерне моделировалась в виде прослойки толщиной 5–10 мкм различной формы и длины.

**Примечание [V468]:** Стр: 300  
[a№1063] Резников А.Н., Гаврилов Г.М. Аппроксимация распределения размеров зерен в алмазных порошках // Синтет. алмазы. - 1974. - № 4. - С. 10-13. {Book: Date 30/07/03 Time 14:03:09}

**Примечание [V469]:** Стр: 300  
[a№5] Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов. - К.: Наукова думка, 1978. - 207 с. {Book: Date 30/07/03 Time 14:05:17}

**Примечание [V470]:** Стр: 300  
[a№3057] Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н. Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов. - Киев: Наук. думка, 1993. - 220 с.

{Book: Date 17/06/03 Time 13:56:45}

**Примечание [N471]:** Стр: 301  
Кизиков Э.Д., Верник Е.Б., Кошевой Н.С. Алмазно-металлические композиции. - К.: Техника, 1988. - 136 с

Давление и температура соответствовала реальному процессу спекания алмазных кругов. Принято, что если приведенные напряжения в алмазном зерне превышали предел его прочности, оно считалось разрушенным (дефектным). Моделировался процесс спекания алмазоносного слоя на различных металлических связках – от алюминиевых до твердосплавных с различными по прочности алмазными зернами – от АС2 до АС160Т.

Результаты 3D моделирования НДС зоны спекания алмазных кругов представлены на рис. 8.3.

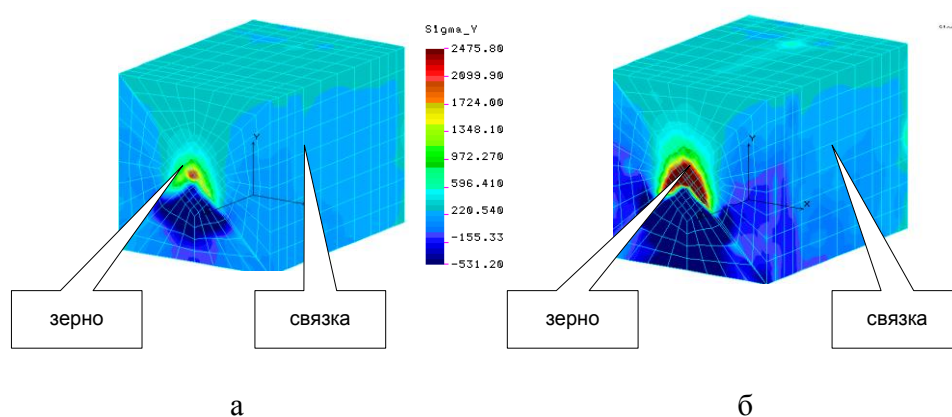


Рис. 8.3. Величина приведенных напряжений в системе «зерно–связка» при 3D моделировании процесса спекания алмазных кругов:  
а – связка М1-01; б – связка ВК8

Путем варьирования сочетанием прочности алмазных зерен и их концентрации в круге для различных металлических связок определялось такое их сочетание, при котором обеспечивалось сохранение целостности алмазных зерен, т.е. они не должны разрушаться в процессе спекания. Установлено, что далеко не все серийно выпускаемые круги с используемым сочетанием марки алмазных зерен и марки металлической связки могут быть изготовлены со стандартной концентрацией алмазных зерен без нарушения их целостности. Так, например, при спекании круга на связке М6-14 с алмазными зернами марки АС6 концентрация их в круге не должна превышать 7 %, в противном случае они будут разрушаться уже в процессе изготовления круга. Показано, что для гарантийного сохранения целостности алмазных зерен практически во всех серийно выпускаемых кругах их концентрация должна быть существенно меньше применяемой. Такая тенденция хорошо увязыва-



ется с возможностью и необходимостью снижения концентрации алмазных зерен в круге до уровня 10–15 % при шлифовании сверхтвердых материалов.

Установлено, что для сохранения целостности алмазных зерен в процессе спекания круга должно быть строго соблюдено сочетание марки алмазных зерен и марки металлической связки. Так, для круга 100 % концентрации зерен в различные металлические связки могут быть заложены алмазные зерна по прочности не ниже указанных в табл. 8.1.

Таблица 8.1 – Предельно допустимые прочности алмазных зерен для различных связок

Связка	M1-01	M2-09	M6-14	BK
Зерно	AC6	AC32	AC50	AC160

Таким образом, на первом этапе исследований установлены оптимальные сочетания прочностей металлической связки и алмазных зерен с предельно допустимой концентрацией их в круге, обеспечивающие сохранение целостности алмазных зерен в процессе изготовления алмазных кругов. Полученные на первом этапе оптимальное соотношение прочностей связки, алмазных зерен и их концентрация являются лишь ограничивающими параметрами (характеристиками) и должны быть уточнены для процесса алмазного шлифования в зависимости от прочностных свойств обрабатываемого материала.

После получения установленных ограничений определяем оптимальное сочетание прочности обрабатываемого материала, связки, алмазных зерен и их концентрации в круге, обеспечивающее максимальную эффективность процесса шлифования. В процессе эксплуатации оптимальное сочетание прочностей связки, алмазных зерен и их концентрации определяем в зависимости от прочностных свойств обрабатываемого материала. Для этого также используется методология 3D моделирования НДС для зоны шлифования.

Оптимальное сочетание прочностей связки, зерен и их концентрация должно обеспечивать такой уровень НДС в зоне шлифования, при котором:

- обеспечивается удержание алмазных зерен в связке;
- исключается хрупкое микроразрушение алмазных зерен (при шлифовании «мягких» материалов) или их самозатачивания без образования площадок износа (при шлифовании «твердых» материалов);
- обеспечиваются максимальные напряжения в обрабатываемом материале (съем припуска);
- исключается образование недопустимого дефектного слоя.

Исходными данными должны быть физико-механические свойства обрабатываемого материала и либо прочность алмазных зерен и связки, тогда результатом расчета будет являться концентрация алмазных зерен, либо прочность связки и концентрация алмазных зерен, тогда результатом расчета будет прочность алмазных зерен и т. д.

Расчетная схема и пример результатов расчета 3D НДС системы «СТМ–зерно–связка» приведены на рис. 6.4–6.5.

Таким образом, теоретически определена область оптимального разрушения элементов системы «СТМ–зерно–связка», в которой зерно удерживается в связке и не разрушается, а СТМ разрушается в контакте, но не растрескивается из-за общей нагрузки всех зерен рис. 8.4).

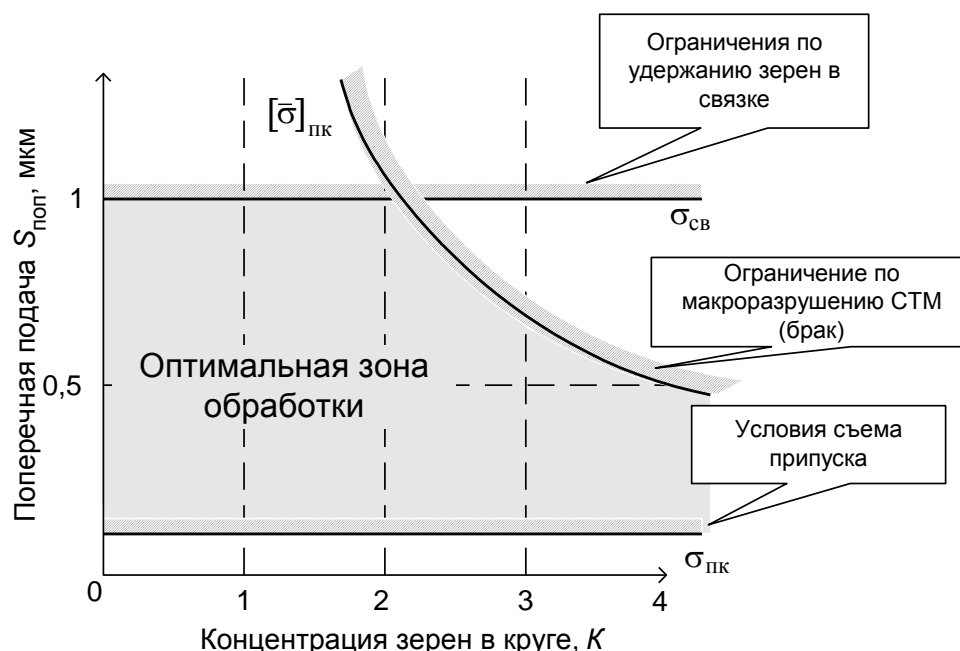


Рис. 8.4. Результаты расчета оптимальной концентрации алмазных зерен и поперечной подачи по прочностным свойствам элементов зоны шлифования

Теоретически может быть определена область оптимальных условий алмазного шлифования различных марок СТМ, в том числе и вновь создаваемых. Дальнейшие экспериментальные исследования с целью сокращения их объема, будут проводиться в этой области.

Применительно к алмазному шлифованию сверхтвердых материалов определены оптимальные характеристики алмазных кругов и условия обработки (табл. 8.2).

Таблица 8.2 – Оптимальные характеристики алмазных кругов на этапе их эксплуатации

Обрабатываемый СТМ	Прочность алмазных зерен	Прочность металлической связки, ГПа	Концентрация алмазных зерен в круге	Скорость шлифования, м/с	Нормальное давление, МПа
АСПК	АС160	600	5–7	40–50	3.0–4.0
АСБ	АС85	500	8–11	35–40	2.5–3.0
ДАП	АС60	400	12–15	30–35	2.0–2.5
СКМ	АС32	300	17–22	25–30	1.5–2.0
Гексанит-Р	АС15	100	25–35	20–30	1.0–1.5
Эльбор-Р	АС15	100	35–50	20–30	1.0–1.5

Такое соотношение прочностных свойств обрабатываемых материалов, связки и алмазных зерен обеспечивает бездефектную обработку при условии максимально возможной производительности и минимального удельного расхода зерен в процессе алмазного шлифования. Определение подобных оптимальных соотношений применительно к процессу алмазного шлифования не только СТМ, но и твердых сплавов, керамики, полимеров и других материалов, является одним из важных резервов повышения эффективности данного вида обработки.

Таким образом, разработана методология определения научно обоснованных рекомендаций по применению оптимального сочетания прочностей связки, алмазных зерен и их концентрации для эффективного шлифования материалов различной прочности. Установлено, что прочность связки круга является важнейшим параметром, определяющим не только степень алмазодержания, но и производительность процесса шлифования. Концентрация алмазных зерен в круге должна назначаться исходя из соотношения прочностей элементов системы «обрабатываемый материал–зерно–связка». Уровень дефектности при алмазном шлифовании СТМ определяется соотношением прочностей СТМ, связки, алмазных зерен и их концентрацией в круге. Выбор зернистости алмазного круга следует проводить с учетом прочностных свойств различных по величине алмазных зерен.

### 8.2.2. Подсистема определения условий бездефектного алмазного шлифования СТМ

Под бездефектностью обработки будем понимать отсутствия брака.

Подсистема «Термо», входящей в состав общей экспертной системы процесса алмазного шлифования СТМ, построена по следующему алгоритму:

- определение параметров 3D топографии обрабатываемой поверхности СТМ;
- определение параметров 3D топографии рабочей поверхности круга;
- определение фактической площади контакта в системе «РПК – СТМ»;
- 3D моделирование термо-силового напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «СТМ – зерно – связка» (определение условий, исключающих брак из-за растрескивания СТМ);
- расчет интенсивности процесса термоактивируемой доводки обрабатываемой поверхности СТМ.

Параметры 3D топографии РПК и СТМ определяются путем лазерного сканирования или теоретически.

При экспериментальном определении фактической площади контакта в системе «СТМ – РПК» использованы результаты изучения параметра относительной опорной площади поверхностей РПК и СТМ  $t_{ps}$  (см. п. 2.3). Поскольку при алмажном шлифовании СТМ твердость обрабатываемого материала практически равна (без учета анизотропии свойств кристаллитов алмаза) твердости алмазных зерен и их внедрение в обрабатываемый материал бесконечно мало, измерение параметра  $t_{ps}$  осуществляли только на уровне 0,1 – 1 мкм от линии выступов.

В качестве фактической площади контакта  $A_r$  принимали среднее значение параметров  $t_{ps}$  для РПК и СТМ:

$$A_r = \frac{t_{ps}^{\text{РПК}} + t_{ps}^{\text{СТМ}}}{2}. \quad (8.1)$$

Теоретические расчеты фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ» производились нами с использованием зависимостей Н. Б. Демкина и И. В. Крагельского [89]. Определив фактическую площадь контакта, переходим к моделированию напряженно-деформированного со-

**Примечание [V472]:** [a№384]  
Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. - М.: Машиностроение, 1977. - 526 с. {Book: Date 31/08/02 Time 11:57:27}

стояния в системе «СТМ – зерно – связка». Поскольку существует мнение [122], что причиной разрушения СТМ может быть существенное различие в коэффициентах термического расширения алмаза и металлофазы, исследовали НДС изучаемой системы. Теоретический анализ термосилового НДС системы «кристаллиты – металлофаза – зерно – связка» осуществляется методом конечных элементов по методике, изложенной в п. 2.3. Задача решается в трехмерном измерении, что выгодно отличает данную методику от применявшихся ранее другими авторами [97, 111]. Расчетная схема взаимодействия элементов системы моделирует наиболее неблагоприятный вариант шлифования при массовом образовании площадок износа на алмазных зернах. Расчетная схема модели и 3D напряжения в системе «СТМ – зерно» представлены на рис. 8.5 а.

Достоинством данной методики является возможность в объемном варианте оценить отдельно влияние поперечной подачи  $S_{\text{поп}}$ , величины нормального давления в контакте «РПК – СТМ»  $P_n$ , физико-механических свойств СТМ, алмазных зерен и связки, температуры в зоне шлифования, температуры СОЖ (или ее отсутствие) на температурные поля, величину главных и приведенных напряжений, вызванных как отдельно силовыми и температурными факторами, так и их суммарным воздействием (термосиловые напряжения).

Пакет программ позволяет также оценивать энергию деформации, по которой легко можно, пользуясь теорией Гриффитса [216] определять возможность образования и развития микротрещин как на поверхности СТМ и алмазных зерен, так и внутри составляющих.

Пример результатов моделирования НДС в системе «кристаллиты СТМ – металлофаза – зерно – связка» приведен на рис. 8.5 б, в, г.

В базовом варианте расчета физико-механические свойства элементов системы «кристаллиты СТМ – металлофаза – зерно – связка» были такими:

- Для алмазного зерна и алмазного кристаллита СТМ: модуль упругости  $E = 10000$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0.1$ , коэффициент теплопроводности при температуре  $300 \text{ K}^\circ$   $a = 0.002$  Вт/мм·K $^\circ$ , коэффициент температурного расширения алмаза в диапазоне до  $750 \text{ K}^\circ$   $\alpha_1 = 3.7 \cdot 10^{-6} \cdot 1/\text{K}^\circ$ .

- Для металлофазы:  $E = 10000$  МПа,  $a = 0.1$  Вт/мм·K $^\circ$ ,  $\alpha_1 = 14.1 \cdot 10^{-6} \cdot 1/\text{K}^\circ$ ,  $G = 38500$ . Для металлической связки (М1-01)

**Примечание [V473]:** [a№3057]  
Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н. Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов. - Киев: Наук. думка, 1993. - 220 с. {Book: Date 31/08/02 Time 11:58:39}

**Примечание [V474]:** [a№3085]  
Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В. Износ алмазов и алмазных кругов. - М.: Машиностроение, 1967. - 112 с. {Book: Date 31/08/02 Time 11:46:48}

**Примечание [V475]:** [a№44] Мишневский Л.Л. Износ шлифовальных кругов. - К.: Наукова думка, 1982. - 192 с. {Book: Date 31/08/02 Time 11:48:44}

**Примечание [V476]:** [a№3115]  
Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids // Philosophica Transactions of the Royal Society. - 1921. - (A) 221. - P. 163-198. {Book: Date 31/08/02 Time 12:00:23}

$E = 72000$  МПа,  $G = 28000$ ,  $\mu = 0.3$ ,  $\alpha_1 = 24 \cdot 10^{-6} \cdot 1/K^\circ$ ,  $a = 0.21$  Вт/мм·K°. Температура в зоне контакта «зерно – СТМ» принята равной  $T = 700$  C°, температура СОТС  $T = 20$  C°, поперечная подача (силовое воздействие)  $S_{\text{поп}} = 5$  мкм/дв. ход.

Достоинством данной методики расчета является трехмерное решение задачи, получение трехмерных температурных полей, трехмерных полей энергий и плотности энергий деформации (см. рис. 8.5 б, в, г). Возможно определение приведенных и главных температурных и термосиловых напряжений в зерне, связке, металлофазе и кристаллите.

Возможность определения главных и приведенных термосиловых напряжений, а также энергии деформирования в любой точке системы «кристаллиты СТМ – металлофаза – зерно – связка» позволяет использовать как энергетический, так и силовой критерии хрупкого разрушения материалов.

Используя, например, методику компьютерного метода конечных элементов для прогнозирования развития дефектного слоя при моделировании НДС обрабатываемой поверхности и учитывая при этом еще силовой и температурный факторы, можно анализировать влияние физико-механических свойств элементов системы, режимов шлифования и характеристик кругов на вероятность бездефектной обработки различных марок СТМ, в том числе и вновь создаваемых.

Из проведенных расчетов определяем условия шлифования ( $S_{\text{поп}}$ ,  $P_n$ , число зерен в контакте, характеристики круга, наличие СОТС), при которых исключается вероятность образования дефектного слоя, т. е. брака при заточке инструмента из СТМ.

Разработанная подсистема «Термо» позволяет анализировать не только условия бездефектной обработки СТМ, но и как подсистема общей теоретической экспертной системы позволяет оптимизировать процесс съема припуска с учетом температурного фактора, как это сделано, например, в работе [19] применительно к шлифованию ситаллов.

На следующем этапе разработки подсистемы «Термо» оцениваем возможность осуществления термоактивируемой доводки обрабатываемой поверхности СТМ.

Разработанная подсистема теоретической экспертной системы алмазного шлифования СТМ позволяет определять условия бездефектной обработки СТМ и условия термоактивируемой доводки лезвийных инструментов из сверхтвердых материалов на основе алмаза.

**Примечание [V477]:** Стр: 308  
[a№3195] Бурмистров В.В Научные  
основы надежности технологических  
систем алмазно-абразивной обработки  
технической керамики и ситаллов. -  
Самара: Диамант-Феникс, 2001. - 122 с.  
{Book: Date 01/09/02 Time 22:49:52}

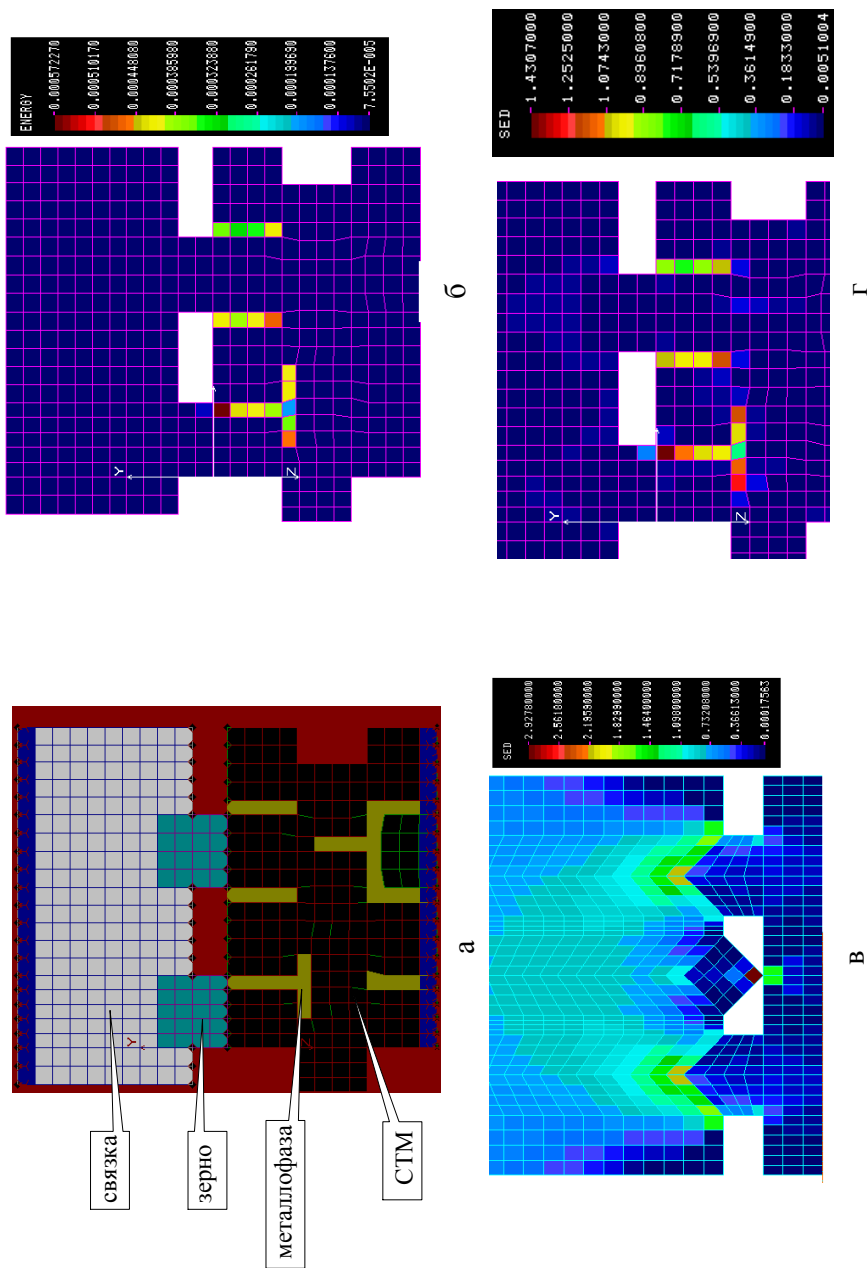


Рис. 8.5. Энергия и плотность энергии деформации элементов системы «кристаллиты СТМ–металлофаза–зерно–связка»:

а – расчетная схема; б – плотность термосиловой энергии деформации;

в – силовая энергия деформации; г – термосиловая энергия деформации.

$$\text{Результаты расчетов: } E_d = S_{\text{поп}}^{0.17} Q^{0.23},$$

$E_d$  – энергия деформации;  $S_{\text{поп}}$  – поперечная подача;  $Q$  – контактная температура

### 8.2.3. Подсистема обеспечения надежности лезвийного инструмента из СТМ на стадии его изготовления

Образование микротрещин на поверхности СТМ может быть обусловлено действием одного или сразу нескольких механизмов термического разрушения, обусловленных различием коэффициентов термического расширения алмазных кристаллитов и металлофазы, окислением меж- и внутрикристаллитных включений СТМ. Включения металла-катализатора (растворителя) сохраняются в СТМ и алмазных зернах после синтеза и концентрируются преимущественно в плоскости (111) [71]. Существенное различие величин коэффициентов термического расширения алмаза и металлофазы, а также анизотропия теплофизических свойств кристаллитов СТМ и алмазных зерен могут влиять как на процесс микроразрушения (съем припуска), так и на макроразрушение (образование дефектного слоя) при шлифовании. По-видимому, это является одной из причин образования трещин на резцах из СТМ при заточке их кругами на органической связке. Визуальный контроль после заточки и доводки не гарантирует надежность работы такого инструмента.

По данным Новикова Н. В. и Девина Л. Н. [118] вероятность разрушения резцов из СТМ даже при чистовом точении может достигать 47 %. Авторы обоснованно связывают надежность с предельными напряжениями на передней и задней гранях резца при резании. Используя вероятностные методы расчета, они учитывают влияние только силового фактора на разрушение СТМ, однако не рассматривают влияние температуры в зоне резания. Использование метода конечных элементов в пакете программ для метода конечных элементов позволяет определять напряженно-деформированное состояние исследуемого объекта, вызванное как отдельно силовыми и температурными факторами, так и их суммарным воздействием.

Для повышения надежности лезвийного инструмента из СТМ предложен новый методологический подход. С использованием выводов Н. В. Новикова [118] о взаимосвязи надежности лезвийного инструмента с предельными напряжениями на передней и задней гранях резца при резании, нами предложено надежность лезвийного инструмента из СТМ определять уже на этапе его заточки и термоактивируемой доводки. В основу его положено то, что процесс заточки и термоактивируемой доводки лезвийного ин-

**Примечание [V478]:** Новиков Н.В., Примак Л.П., Майстренко А.Л., Ващенко А.Д. Исследование распространения усталостных трещин в монокристаллах синтетических алмазов. // ДАН СССР.— 1981.— 256, № 1.— С. 1122—1126.

**Примечание [V479]:** [a№3248] Новиков Н.В., Девин Л.Н. Надежность лезвийных инструментов из ПСТМ при чистовом точении закаленных сталей // Сб. науч. тр. Института сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля НАН Украины. Серия Г: Процессы механической обработки, станки и инструменты. - Киев, 2002. С.273-280. {Book: Date 28/08/02 Time 04:14:16}

**Примечание [V480]:** [a№3248] Новиков Н.В., Девин Л.Н. Надежность лезвийных инструментов из ПСТМ при чистовом точении закаленных сталей // Сб. науч. тр. Института сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля НАН Украины. Серия Г: Процессы механической обработки, станки и инструменты. - Киев, 2002. С.273-280. {Book: Date 28/08/02 Time 04:14:16}



струмента осуществляется в термосиловых условиях, близких к условиям его эксплуатации, т. е. характеризуется наличием высоких давлений и температур как в зоне шлифования (при его заточке), так и в зоне резания (при эксплуатации инструмента из СТМ). Целесообразно так затачивать и доводить лезвийные инструменты из СТМ, чтобы дефекты, полученные при синтезе проявлялись до их эксплуатации, т. е. отбраковка производилась бы еще на стадии их изготовления.

Поскольку в процессе эксплуатации лезвийный инструмент часто испытывает более жесткие термосиловые нагрузки, чем в процессе его заточки и доводки, представляется нецелесообразным выбор щадящих условий его заточки и доводки. Поступая таким образом, изготовители лезвийного инструмента из СТМ не гарантируют, что такой инструмент в более жестких термосиловых условиях эксплуатации окажется надежным. В связи с этим уже на стадии заточки и доводки лезвийного инструмента необходимо создавать в нем термосиловые нагрузки, эквивалентные или даже несколько превышающие те, которые этот инструмент будет испытывать в экстремальных условиях его эксплуатации.

Алгоритм осуществления данного подхода следующий. Вначале с помощью пакета прикладных программ по методам конечных элементов рассчитываются предельные термосиловые напряжения в режущем клине резца в экстремальных условиях его эксплуатации (рис. 8.6 а). Для этого трехмерная модель лезвийного инструмента нагружается силой резания  $P$  и температурой  $T$  по величине, несколько превышающей те значения, которые этот инструмент может испытывать в экстремальных условиях его эксплуатации.

Полученные значения термосиловых напряжений являются базовыми для решения обратной задачи – нахождения режимов и условий заточки и термоактивируемой доводки по известному напряженному состоянию резца из СТМ в экстремальных условиях его работы.

Применяемый пакет позволяет решать задачу в трехмерном измерении (3D моделирование), а в ходе решения обратной задачи с его использованием можно по известному уровню эксплуатационных термосиловых напряжений определить скорость шлифования, поперечную подачу, нормальное давление в контакте для конкретных, физико-механических свойств шлифуемого СТМ, алмазных зерен и связки шлифовального круга (рис. 8.6 б).

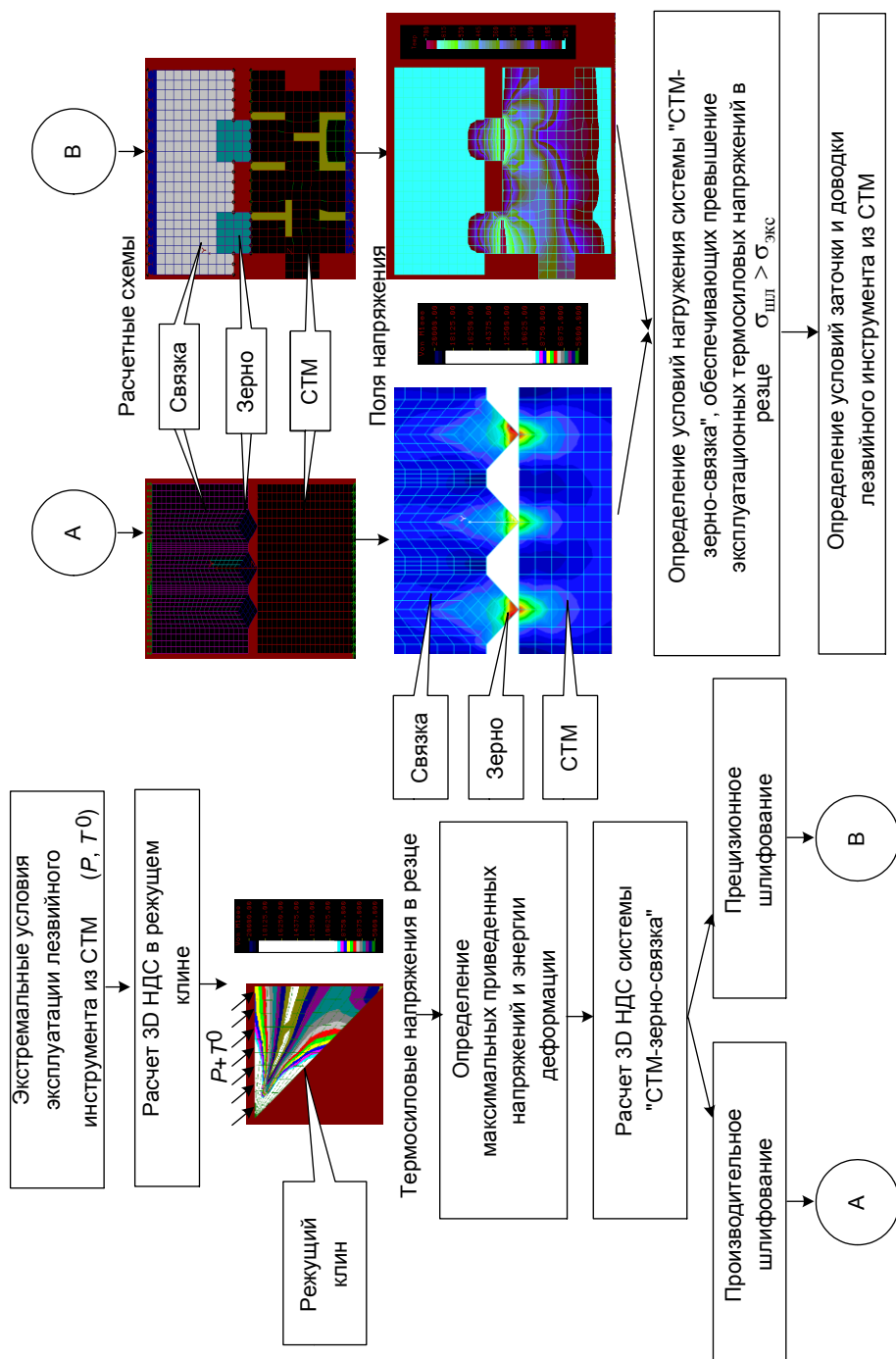


Рис. 8.6. Схема определения надежности лезвийного инструмента из СТМ на стадии изготовления:  
а – расчет термосиловых напряжений в резце; б – определение условий заточки и доводки лезвийного инструмента из СТМ

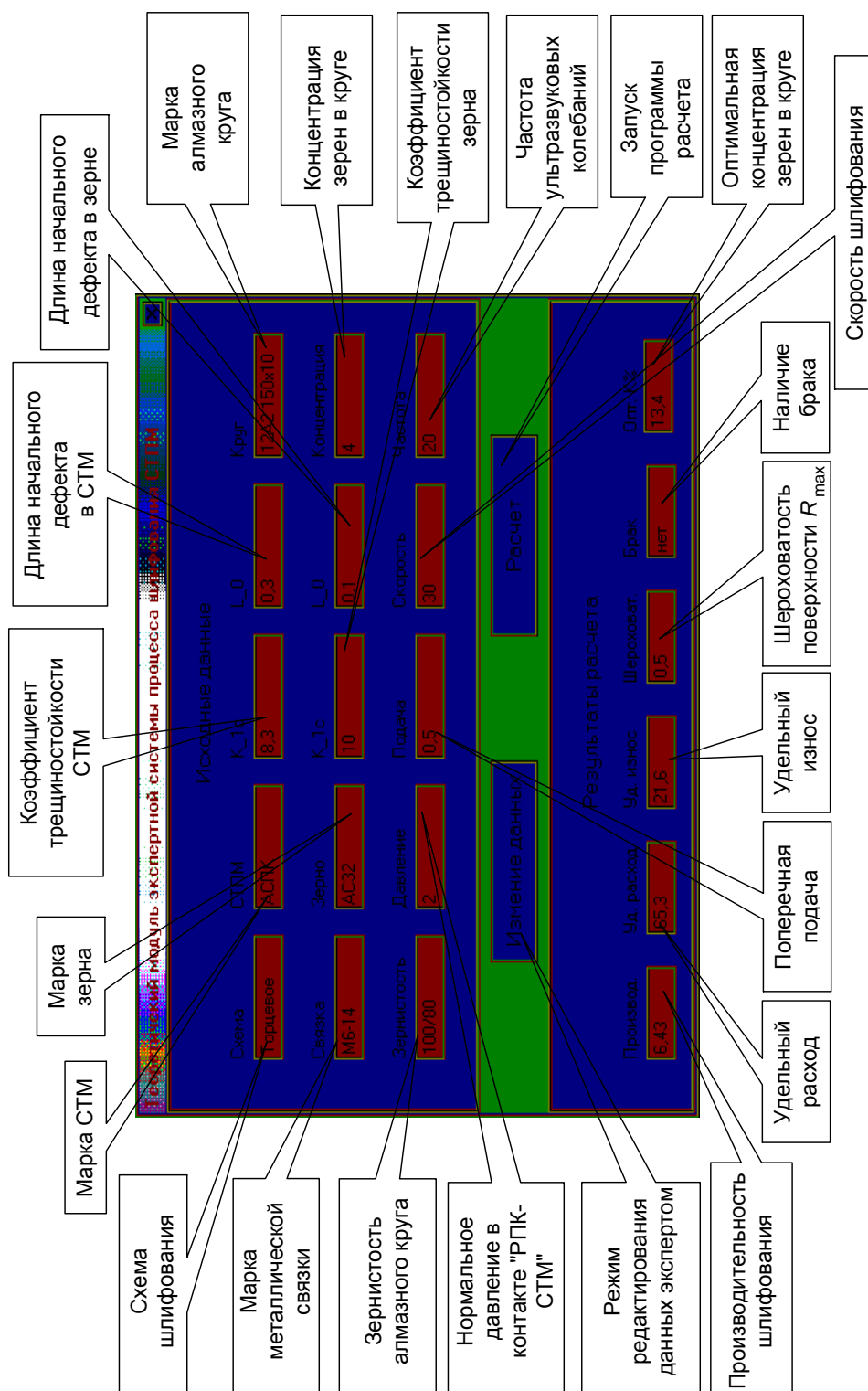
Полученные в ходе решения обратной задачи значения режимов термоактивируемой доводки и другие условия алмазного шлифования обеспечат наличие в модели затачиваемого СТМ термосиловых напряжений, превышающих эксплуатационные. Таким образом, определяются условия доводки, при которых дефекты СТМ вскрываются еще на стадии изготовления инструмента.

Итак, исходной информацией при назначении режимов заточки и доводки лезвийного инструмента из СТМ должны являться силы резания и температуры, которые этот инструмент будет испытывать в экстремальных условиях его эксплуатации. Приложив эти силы и контактные температуры к модели резца (см. рис. 8.3 а), методом конечных элементов определяем величину предельных термосиловых напряжений, которые будет испытывать этот резец в процессе работы. Далее, решая обратную задачу, подбирают такие режимы заточки (скорость, подачу и т. д.), которые обеспечат наличие в модели затачиваемого СТМ (см. рис. 8.3 б) термосиловые напряжения, превышающие эксплуатационные. Тем самым определяются условия заточки и доводки, при которых дефекты синтеза СТМ должны проявиться еще на стадии изготовления.

Необходимость и возможность совмещения доводочной и контрольной операций при изготовлении лезвийного инструмента из СТМ согласно изложенным выше принципам позволяют существенно повысить надежность применения такого инструмента.

Таким образом, теоретически и экспериментально доказано положение о необходимости и возможности совмещения термодоводочной и контрольной операций при изготовлении лезвийного инструмента из СТМ путем осуществления термоактивируемой доводки при термосиловых нагрузках, близких к экстремальным условиям его эксплуатации.

Разработанный теоретический модуль экспертной системы процесса алмазного шлифования СТМ базируется на объединении в единую систему разработок по определению фактической площади контакта в системе «РПК – СТМ», результатов расчета объемов разрушенных СТМ и зерен в зависимости от условий взаимодействия, величины критической заделки зерен в связку, определение условий бездефектной обработки и/или эксплуатационной надежности лезвийного инструмента. Теоретический модуль представляет собой компьютерную программу, состоящую из нескольких подсистем, представляющих законченный программный продукт. Главная форма интерфейса теоретического модуля представлена на рис. 8.7.



Программное обеспечение теоретического модуля экспертной системы приведено в приложении А.

В основу теоретических расчетов положено 3D моделирование напряженно-деформированного состояния системы «РПК – СТМ». Теоретический модуль позволяет прогнозировать область оптимальных условий бездефектной обработки (см. рис. 5.12) и количественно оценивать производительность шлифования, удельный износ и расход алмазных зерен, шероховатость обработанной поверхности различных марок СТМ.

### **8.3. Разработка экспериментального модуля экспертной системы**

Экспериментальный модуль экспертной системы разработан на базе компьютерной обработки результатов экспериментальных исследований и позволяет с участием пользователя – эксперта (или без него) определять оптимальные условия процесса алмазного шлифования различных СТМ при конкретных ограничивающих факторах, т. е. при определенных реальных возможностях производства. Определен весовой вклад в повышение эффективности алмазного шлифования СТМ различных входных параметров процесса обработки, что позволяет в отдельных случаях принимать решение в экспертной системе без участия эксперта.

Разработка экспериментального модуля экспертной системы базируется на результатах многофакторного планирования экспериментальных исследований процесса алмазного шлифования СТМ.

#### **8.3.1. Разработка целевых функций экспериментальной экспертной системы**

Разработка экспериментального модуля основана на функционально-регрессионном анализе результатов планирования четырехфакторного эксперимента. В качестве факторов-аргументов выбраны наиболее представительные параметры условий обработки, неустановленные ранее [165].

При исследовании влияния режимов алмазного шлифования и характеристик кругов на показатели управляемого процесса шлифования различных СТМ применили многофакторное планирование эксперимента. В связи с тем, что изучаемый процесс не имеет априорной информации, с использованием

**Примечание [V481]:** Стр: 318  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 01/09/02 Time 12:58:56}

теоретического модуля экспертной системы предварительно определяли оптимальную область (см. п. 5.5) и описали ее планом второго порядка типа В<sub>4</sub>. Значения факторов и уровни их варьирования для процесса обработки АСПК и ДАП приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1 – Уровни варьирования факторов

Фактор	Частота ультразвуковых колебаний $f$ , кГц			Сила тока в цепи управления, А			Скорость круга $V$ , м/с			Нормальное давление $P_n$ , МПа		
Кодовое обозначение	$x_1$			$x_2$			$x_3$			$x_4$		
Уровень	0	+	–	0	+	–	0	+	–	0	+	–
Значение фактора	24	30	18	60	80	40	30	40	20	1.5	2.0	1.0

Скорость круга в нашем случае имеет значение не только как фактор, определяющий частоту контактирования зерна с обрабатываемой поверхностью, а и как фактор, определяющий силу соударения зерна с СТМ и, как следствие, интенсивность микроразрушения припуска СТМ и самозатачивания зерна.

На основании компьютерной обработки результатов экспериментальных исследований получены уравнения регрессии для различных выходных показателей процесса ультразвукового алмазного шлифования различных марок СТМ.

В качестве примера приведены уравнения регрессии производительности  $Q$ , удельного расхода  $q$ , себестоимости обработки  $C$ , тангенциальной составляющей силы резания  $P_z$ , коэффициента шлифования  $K_{ш}$  и удельной энергоёмкости процесса шлифования  $B$  для различных марок СТМ.

Для производительности:

$$\begin{aligned}
 Y_{Q_{\text{АСПК}}} = & 5.149 + 0.17x_1 + 0.467x_2 + 0.47x_3 + 0.713x_4 + 0.174x_1^2 + 0.4x_2^2 - \\
 & - 0.294x_3^2 + 0.251x_4^2 + 0.369x_1x_2 - 0.199x_1x_3 - 0.122x_1x_4 - \\
 & - 0.44x_2x_3 + 0.186x_2x_4;
 \end{aligned} \quad (8.2)$$

$$\begin{aligned}
 Y_{Q_{\text{ДАП}}} = & 7.99 + 3.08x_1 + 1.65x_2 + 0.6x_3 + 3.45x_4 - 0.84x_1^2 + 1.1x_2^2 - \\
 & - 0.8x_3^2 + 0.25x_4^2 + 0.369x_1x_2 - 0.199x_1x_3 - 1.72x_1x_4 - \\
 & - 0.19x_2x_3 + 0.186x_2x_4 + 0.3x_3x_4.
 \end{aligned} \quad (8.3)$$

Для удельного расхода:

$$Y_{q \text{ АСПК}} = 63.474 - 0.47x_1 + 7.395x_2 + 3.739x_3 - 8.59x_4 + 10.776x_1^2 - \\ - 3.684x_2^2 + 8.634x_4^2 - 2.416x_3^2 - \\ - 4.419x_1x_2 + 3.656x_1x_3 + 2.019x_1x_4 + 3.619x_2x_3 + 2.806x_2x_4; \quad (8.4)$$

$$Y_{q \text{ ДАП}} = 40.73 - 0.01x_1 + 0.12x_2 - 5.41x_3 - 3.07x_4 + \\ + 3.29x_1^2 - 1.84x_2^2 + 2.42x_3^2 - 8.63x_4^2 - \\ - 4.42x_1x_2 + 3.66x_1x_3 + 1.72x_1x_4 + 0.83x_2x_3 + 2.82x_2x_4 - 1.5x_3x_4. \quad (8.5)$$

Для удельной себестоимости:

$$Y_{cy \text{ АСПК}} = 11.144 - 0.197x_1 + 1.373x_2 - 0.777x_3 - 1.726x_4 + \\ + 1.634x_1^2 - 0.727x_2^2 + 0.914x_3^2 - 1.216x_4^2 - \\ - 0.873x_1x_2 + 0.719x_1x_3 + 0.39x_1x_4 + 0.743x_2x_3 + 0.569x_2x_4; \quad (8.6)$$

$$Y_{cy \text{ ДАП}} = 16.16 - 0.02x_1 + 0.03x_2 - 1.05x_3 - 0.6x_4 + \\ + 0.64x_1^2 - 0.36x_2^2 - 1.07x_3^2 - 0.38x_4^2 - \\ - 0.19x_1x_2 + 1.02x_1x_3 - 0.33x_1x_4 + 0.16x_2x_3 + 0.55x_2x_4 - 0.29x_3x_4. \quad (8.7)$$

Для тангенциальной составляющей силы резания:

$$Y_{P_z \text{ АСПК}} = 5.85 + 3.4x_1 + 2.9x_2 - 4.8x_3 + 1.4x_4 - 7.7x_1^2 + 2.2x_2^2 - 0.3x_3^2 - \\ - 0.4x_4^2 + 0.84x_1x_2 + 1.3x_1x_4 - 0.51x_2x_3 - 2.7x_3x_4. \quad (8.8)$$

Для удельной энергоемкости процесса:

$$Y_B \text{ АСПК} = 3.93 - 0.07x_1 - 0.09x_2 + 0.404x_3 + 0.162x_4 - \\ - 0.306x_1^2 + 0.159x_3^2 - 0.31x_4^2 - \\ - 0.384x_1x_2 + 0.34x_1x_3 + 0.277x_1x_4 + 0.17x_2x_3 + 0.147x_3x_4. \quad (8.9)$$

Для коэффициента шлифования:

$$Y_B \text{ АСПК} = 0.29 + 0.013x_1 + 0.013x_2 - 0.02x_3 - 0.024x_4 - \\ - 0.035x_1^2 + 0.02x_2^2. \quad (8.10)$$

Анализ значимости коэффициентов регрессии свидетельствует, что на выходные показатели управляемого процесса шлифования СТМ оказывают

влияние практически все учитываемые факторы. В отличие от традиционного алмазного шлифования СТМ влияние этих факторов не меняется с продолжительностью обработки. Различная степень их влияния и наличие эффектов взаимодействия свидетельствует о сложности явлений, происходящих в зоне шлифования и зоне управления.

Эти зависимости позволяют установить основные тенденции влияния режимов шлифования и характеристик кругов на выходные показатели обработки СТМ (рис. 7.12).

Такая тенденция справедлива только для управляемого процесса шлифования, т. е. в условиях его стабильности. В традиционном шлифовании эти тенденции могут быть прямо противоположны.

На основании многочисленных экспериментальных исследований процесса алмазного шлифования различных марок СТМ кругами с широкой гаммой характеристик были получены экспериментальные целевые функции (аналогичные приведенным выше) практически для всех выходных показателей. На базе этих целевых функций разработана экспериментальная экспертная система процесса алмазного шлифования СТМ. Кроме собственных результатов при создании базы знаний экспериментального модуля экспертной системы использованы экспериментальные результаты, полученные в кандидатских диссертациях, выполненных под руководством А. И. Грабченко Ходоревским М. Г. [199], Русановым В. В. [156], Пыжовым И. Н. [147], Островерхом Е. В. [134], **Наконечным Н. Ф. [ ]**.

### 8.3.2. Структура и принцип работы экспериментального модуля экспертной системы

Экспериментальный модуль экспертной системы состоит из банка данных, предназначенного для практического пользования на промышленных предприятиях, занимающихся обработкой сверхтвердых поликристаллических материалов (СТМ), например, при заточке различных лезвийных инструментов из них. Банки данных содержат сведения о применяемом оборудовании, о заготовках, алмазных кругах, оснастке. Разработанная экспертная система должна обеспечивать получение оптимальных условий алмазного шлифования (режимы обработки и характеристики кругов, режимы управления процессом приспособляемости).

В основу экспертной системы положены экспериментальные целевые функции, описывающие зависимости производительности обработки  $Q$ , ше-

Примечание [V482]: пути-2

**Примечание [V483]:** [a№3326] Ходоревский М.Г. Исследование процесса алмазного шлифования синтетических сверхтвердых материалов: Дис... канд. техн. наук: 05.03.01. - Х., 1975. - 214 с. {Book: Date 28/08/02 Time 14:00:27}

**Примечание [V484]:** [a№422] Русанов В.В. Исследование физических явлений и качества поверхности при алмазном шлифовании композиции "синтетические сверхтвердые материалы - сталь": Автореф. дис... канд. техн. наук. - Киев, 1980. - 23 с. {Book: Date 28/08/02 Time 14:01:18}

**Примечание [V485]:** [a№3042] Пыжов И.Н. Алмазное шлифование двухслойных сверхтвердых композиционных материалов: Дис... канд. техн. наук: 05.03.01.- Харьков. - 1983. - 247 с. {Book: Date 28/08/02 Time 14:02:10}

**Примечание [V486]:** [a№421] Островерх Е.В. Тепловые явления и качество поверхностного слоя при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: Автореф. дис... канд. техн. наук. - Киев, 1986. - 17 с. {Book: Date 28/08/02 Time 14:02:54}



роховатости граней и кромки обработанных поверхностей  $t_{ps}$ , радиуса округления режущей кромки  $\rho$  от режимов обработки (скорость круга  $V$ ), поперечная подача  $S_{\text{поп}}$ , нормальное давление), характеристик алмазных кругов (зернистость, концентрация) и режимов правки (ток в цепи управления и частота ультразвуковых колебаний). Назначение экспертной системы – определение оптимальных режимов шлифования и характеристик кругов при оптимизации процесса алмазного шлифования СТМ по максимальной производительности, минимальной (или заданной чертежом) шероховатости обработанной поверхности или минимальному радиусу округления режущих кромок. Для реализации поставленной задачи создано программное обеспечение в рамках пакета Delphi 3 (приложение Б).

При написании программ оптимизации процесса шлифования по максимальной производительности, по минимальной шероховатости обработанной поверхности и по максимальной остроте режущей кромки использовались следующие приемы: представление переменных  $x_1, x_2, x_3, x_4$  в виде массивов целых чисел  $(-1, 0, 1)$ ; нахождение в цикле всех возможных результатов решения целевой функции; запись этих результатов в массив; нахождение в этом массиве максимального или минимального значения (в зависимости от постановки задачи); определение, при каких значениях переменных  $x_1, x_2, x_3, x_4$  был получен найденный результат; присвоение переменным  $x_1, x_2, x_3, x_4$  их истинных значений; вывод на экран результатов выполнения программы.

При написании остальных программ использовались следующие приемы: представление трех из четырех переменных в виде массивов целых чисел  $(-1, 0, 1)$ ; запись в четвертую переменную значения, введенного или выбранного пользователем; нахождение в цикле всех возможных результатов решения уравнений; запись этих результатов в массив; нахождение в этом массиве максимального или минимального значения (в зависимости от постановки задачи); определение, при каких значениях трех переменных был получен найденный результат; присвоение трем переменным их истинных значений; вывод на экран результатов выполнения программ.

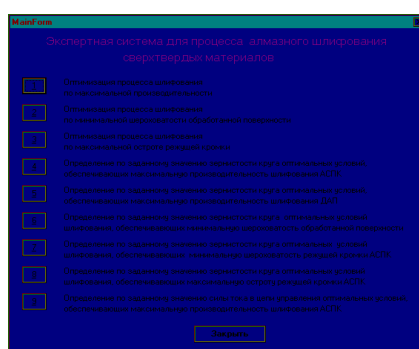
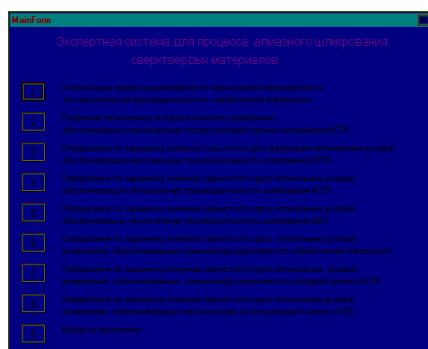
При написании программ для определения условий шлифования, обеспечивающих получение заданной чертежом шероховатости, кроме перечисленных выше приемов использовались: сортировка полученного массива; запись в переменную введенного пользователем значения (если оно входит в

заданный интервал); нахождение в отсортированном массиве ближайшего меньшего из полученных расчетных значений.

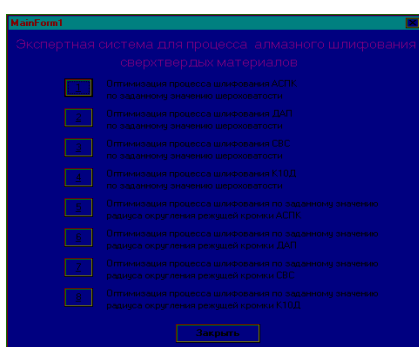
Экспериментальный модуль экспертной системы [38] позволяет оптимизировать процесс алмазного шлифования различных СТМ (АСПК, ДАП, СВС, К10Д) по производительности, шероховатости граней и режущей кромки, радиусу ее округления у затачиваемых прецизионных лезвийных инструментов.

Разработанная экспериментальная экспертная система обеспечивает получение оптимальных условий алмазного шлифования (режимы обработки и характеристики кругов, режимы правки). Главные формы экспериментального модуля экспертной системы процесса алмазного шлифования представлены на рис. 8.8.

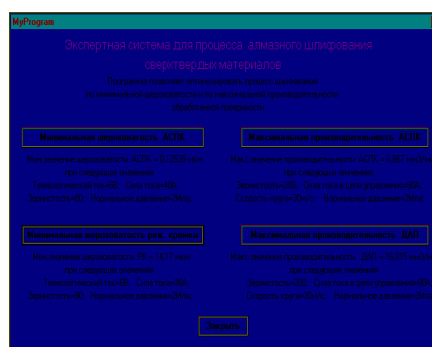
**Примечание [V487]:** [a№3247]  
Грабченко А.И., Федорович В.А. Экспертная система процесса алмазного шлифования сверхтвердых материалов // Сб. науч. тр. Института сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля НАН Украины. Серия Г: Процессы механической обработки, станки и инструменты. - Киев, 2002. - 541 с. {Book: Date 06/06/02 Time 23:23:15}



а



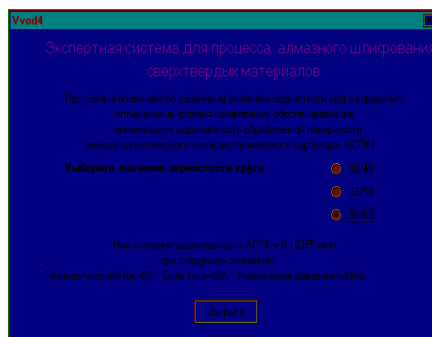
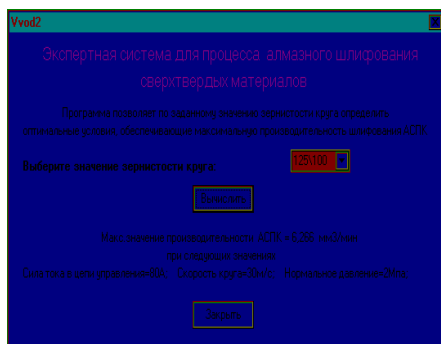
б



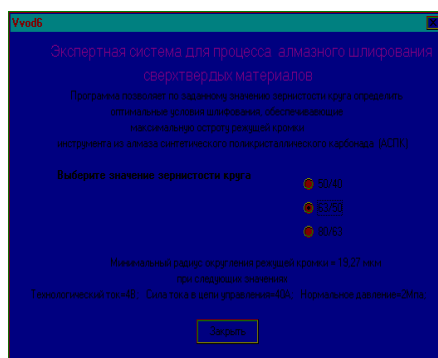
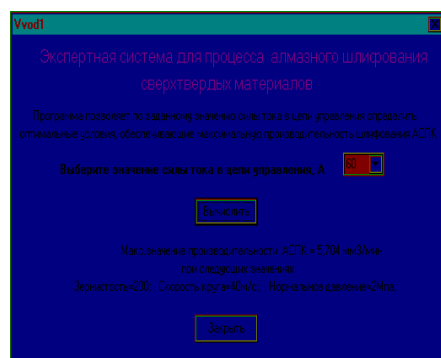
в

Рис. 8.8. Окна программы экспериментального модуля экспертной системы процесса шлифования СТМ:

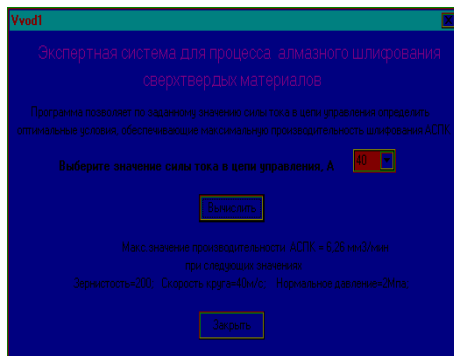
а, б – главные формы экспериментального модуля экспертной системы;  
в – форма вывода результатов расчетов оптимальных условий обработки



Г

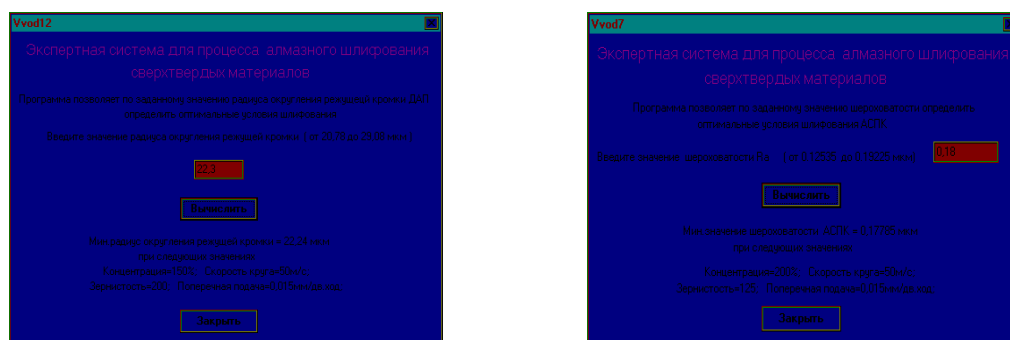


Д



е

Рис. 8.8. Окна программы экспериментального модуля экспертной системы процесса шлифования СТМ (продолжение):  
г, д, е – формы вывода результатов расчетов оптимальных условий обработки



ж

Рис. 8.8. Окна программы экспериментального модуля экспертной системы процесса шлифования СТМ (продолжение):

ж – формы вывода результатов расчетов оптимальных условий обработки

Таким образом, разработан экспериментальный модуль экспертной системы процесса алмазного шлифования и термоактивируемой доводки СТМ. Предложенные способы алмазного шлифования позволяют объединить процессы производительного и доводочного алмазного шлифования СТМ за счет комбинированного управления параметрами РПК в процессе обработки и управлять качеством обработанной поверхности.

При пользовании экспериментальной экспертной системой потребителю достаточно выбрать необходимый вид оптимизации и нажатием клавиши получить результат (см. рис. 8.8).

#### 8.4. Условия и способы повышения качества поверхности и надежности лезвийного инструмента из СТМ

Поскольку в настоящее время основным видом изделий из сверхтвёрдых материалов все еще является лезвийный инструмент, качество обработки рассмотрим на примере его заточки.

Эффективность и надежность работы лезвийного инструмента из СТМ определяется шероховатостью его граней и режущих кромок, радиусом их округления, отсутствием эффектного поверхностного слоя, а также наличием сетки микротрещин на рабочих поверхностях.

Качество обработанного поверхностного слоя сверхтвёрдых материалов непосредственно зависит от того, какие механизмы разрушения припуска

реализуются в тех или иных условиях шлифования. Следовательно, состояние рабочей поверхности круга является определяющим для качества обработанной поверхности СТМ [165].

Управляя параметрами рабочей поверхности круга с различной интенсивностью [188], можно влиять на качество поверхности всех обрабатываемых СТМ в пределах, определяемых структурой и свойствами поликристаллов. Снижению шероховатости способствует увеличение зернистости, скорости круга и наличие контакта связки с обрабатываемой поверхностью. Рост нормального давления, тока цепи управления и интенсивности ультразвуковой правки круга ухудшают шероховатость. Эти тенденции справедливы для всех марок обрабатываемых материалов, однако абсолютные значения шероховатости, безусловно, связаны со структурой СТМ – для однородных мелкозернистых они ниже. Сверхтвердые материалы на основе нитрида бора характеризуются меньшей шероховатостью по сравнению с алмазами.

Количественная оценка параметров субмикрорельефа и шероховатости обработанной поверхности подтверждает связь интенсификации шлифования с реализацией механизмов хрупкого разрушения СТМ под влиянием режущих зерен алмазного круга. Эта закономерность проявляет себя неизменно при варьировании такими условиями обработки, как нормальное давление, скорость круга, зернистость и т. д. Анализ динамики изменения параметров РПК позволяет сделать вывод о практически полном соответствии характера разрушения алмазных зерен и обрабатываемой поверхности СТМ.

Управление процессом приспособляемости должно осуществляться как за счет режимов шлифования и характеристик кругов, так и за счет дозируемого удаления связки и ультразвукового формирования субмикрорельефа алмазных зерен в зоне шлифования и/или в автономной зоне управления.

Для реализации процесса управления уровнем приспособляемости в системе «круг–деталь» и осуществления возможности производительной и прецизионной обработки одним и тем же кругом разработаны способы ультразвукового шлифования с комбинированным адаптивным управлением режущим рельефом круга [188]. Разработанные способы позволяют изготавливать прецизионный инструмент из СТМ с шероховатостью обработанной поверхности  $Ra < 0.15$  мкм и относительной опорной площадью обработанной поверхности СТМ ( $t_{ps}$  при  $P = 10\%$ ) более 60 %. Стойкостные испытания лезвийного инструмента из различных марок СТМ, заточенных и доведенных предложенными способами, показали их высокую эффективность и надеж-

**Примечание [V488]:** Стр: 325  
[a№70] Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Book: Date 01/09/02 Time 22:51:33}

**Примечание [V489]:** [a№3220]  
Федорович В.А. Ковалец М. Исследование качества поверхностного слоя поликристаллических сверхтвердых материалов при шлифовании // Вестник национального технического университета Украины. Киев- 2001. Вып. 40 - С. 328-336. {Book: Date 31/08/02 Time 13:06:11}

**Примечание [V490]:** Стр: 326  
[a№3032] Федорович В.А. Способы шлифования с комбинированным управлением режущим рельефом кругов // Вестник ХГПУ. - Харьков: ХГПУ. - 1999. Вып. 45. - С. 26-28. {Book: Date 01/09/02 Time 22:52:31}

ность. При этом установлено, что определяющим параметром оценки качества обработанной поверхности являются не традиционно применяемые параметры шероховатости  $Ra$  и  $Rz$ , а относительная опорная площадь обработанной поверхности  $t_{ps}$ , измеряемая методом лазерного сканирования.

Оптимизация процесса шлифования по одному из параметров – шероховатости обработанной поверхности, шероховатости и радиуса округления режущей кромки инструментов из СТМ достигается в предложенном способе термоактивируемой доводки.

Высокие температуры в зоне шлифования способствуют интенсификации процесса термоактивируемой доводки и создают в зоне шлифования термосиловые напряжения, соответствующие экстремальным условиям эксплуатации лезвийного инструмента из СТМ.

Разработанная экспериментальная экспертная система позволяет оптимизировать процесс алмазного шлифования различных СТМ (АСПК, ДАП, СВС, К10Д) по производительности, шероховатости граней и режущей кромки, радиусу ее округления у затачиваемых прецизионных лезвийных инструментов (см. рис. 8.8).

Кромка влияет как на срок службы инструмента, так и на качество обработанной поверхности и точность размеров деталей, обрабатываемых ими. Интенсивность износа инструмента из СТМ во многом определяется наличием концентраторов напряжений на рабочих элементах и температурой в зоне резания, что, в свою очередь, зависит от шероховатости рабочих поверхностей инструмента. Было изучено влияние режимов обработки, характеристики кругов, вида обрабатываемого поликристалла на микрогеометрию режущей кромки затачиваемого инструмента. Исследование микрогеометрии элементов режущей кромки инструмента осуществлялось методом лазерного сканирования.

Было установлено, что при алмазной обработке режущей части инструментов из СТМ шероховатость кромки и ее образующих поверхностей может различаться в 50 – 70 раз и улучшение микрогеометрии режущей кромки не может быть достигнуто только за счет уменьшения шероховатостей передней и задней поверхностей инструмента. Учитывая, что при шлифовании разрушение синтетического сверхтвердого поликристалла по сравнению с твердым сплавом и минераллокерамикой носит более хрупкий характер (доля пластического деформирования очень мала), можно предположить, что формирование режущей кромки в исследуемом случае происходит

за счет сколов. Кроме того, на формирование кромки накладывает свой отпечаток хрупкий характер разрушения поликристалла при скольжении по его поверхности алмазных зерен круга, а также разрушение отрывом в результате волновых процессов.

Существенное влияние на размер сколов оказывает теплонапряженность в зоне резания и связанные с ней фазовые превращения в прикромочных участках. Немаловажную роль в образовании сколов режущей кромки может играть наличие пор и трещин в поликристаллах, особенно в поликристаллах синтетического балласа. Это ослабляет прочность режущей кромки инструмента.

Острота кромки при этом зависит в основном от абсолютной величины скола, а шероховатость от взаимного наложения отдельных микросколов, образованных каждым алмазным зерном, находящимся в контакте с кромкой. Поэтому изменение одного и того же параметра процесса обработки может по-разному влиять на закономерность изменения шероховатости и радиуса округления режущей кромки.

Важную роль здесь могут играть размеры кристаллитов СТМ, а также степень их взаимного прорастания. Очевидно, что чем выше степень взаимного прорастания кристаллитов, возникающая в процессе синтеза, тем меньше вероятность вырывания отдельных целых кристаллитов из основного объема поликристаллов, т. е. возможности для проявления интеркристаллитного разрушения меньше. Видимо, основным будет механизм транскристаллитного разрушения, следствием чего режущая кромка может быть более острой и менее шероховатой.

Наименьшей шероховатостью кромки обладают резцы, заточенные кругами на связке М6-14 (МЖ). Это объясняется высоким содержанием в ней железа и интенсификацией диффузионных и окислительных процессов в зоне шлифования, способствующих термоактивируемой доводке. В исследуемом диапазоне параметров обработки шероховатость кромки изменяется в пределах 10 ... 15 мкм.

Увеличение скорости круга уменьшает силу резания как суммарную, так и приходящуюся на отдельное зерно. В результате этого уменьшаются сколы режущей кромки.

Таким образом, особенностью формирования микрогеометрии режущей кромки лезвийного инструмента из СТМ при обработке предложенными способами является стабильно высокая режущая способность алмазного кру-

га, а также электро-физико-химические процессы, протекающие в зоне управления. Процесс заточки лезвийного инструмента из СТМ следует осуществлять в два этапа, но одним и тем же алмазным кругом. На первом этапе осуществляем предварительную (производительную) обработку с включенной системой управления процессом приспособляемости, а затем, выключив систему управления, производим процесс термоактивируемой доводки, обеспечивающий требуемое качество граней и режущей кромки инструмента и его надежность в процессе эксплуатации даже в экстремальных условиях. Такой подход расширяет возможности использования лезвийного инструмента их СТМ, в том числе и в автоматизированном производстве.

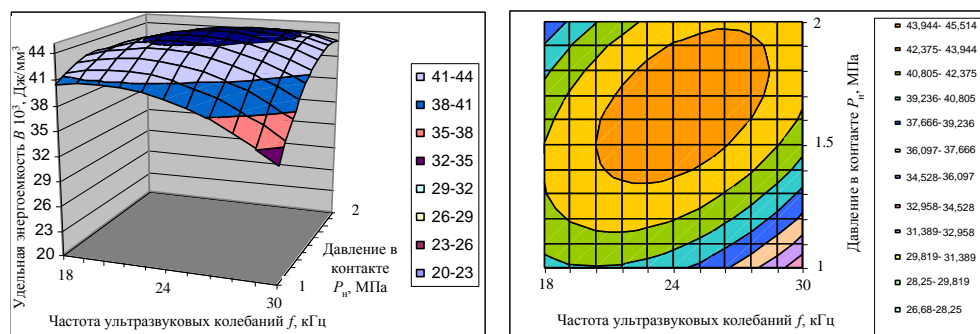
### 8.5. Оптимизация процесса алмазного шлифования СТМ

Разработанная экспертная система процесса алмазного шлифования различных марок СТМ позволяет оптимизировать процесс бездефектной обработки по любому из выбранных параметров оптимизации. Придерживаясь выбранной методологии 3D моделирования на всех этапах проводимых исследований, процесс оптимизации также осуществляем в трехфакторном пространстве (рис. 8.9, 8.10, 8.11). Особенностью предложенной методологии оптимизации является производимая оценка весового вклада каждого из входных параметров в выходные показатели процесса алмазного шлифования СТМ (см. рис. 8.11 б). Такой подход является необходимым элементом экспертной системы, поскольку по уровню весового вклада фактора экспертная система может без участия эксперта принять решение по изменению входных параметров условий шлифования. Результаты использования экспериментального модуля экспертной системы для оптимизации процесса ультразвукового алмазного шлифования различных марок СТМ приведены в приложении В.

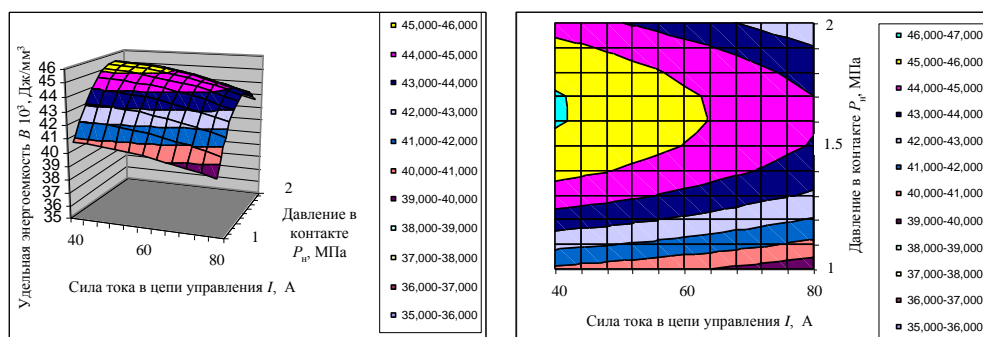
Для унификации весового вклада каждого фактора в изменение выходных показателей процесса шлифования СТМ используется не абсолютная, а относительная их величина (см. рис. 8.11 б).

На основании проведенной в экспертной системе оптимизации процесса алмазного шлифования различных марок СТМ получены рекомендуемые условия их обработки (рис. 8.12).





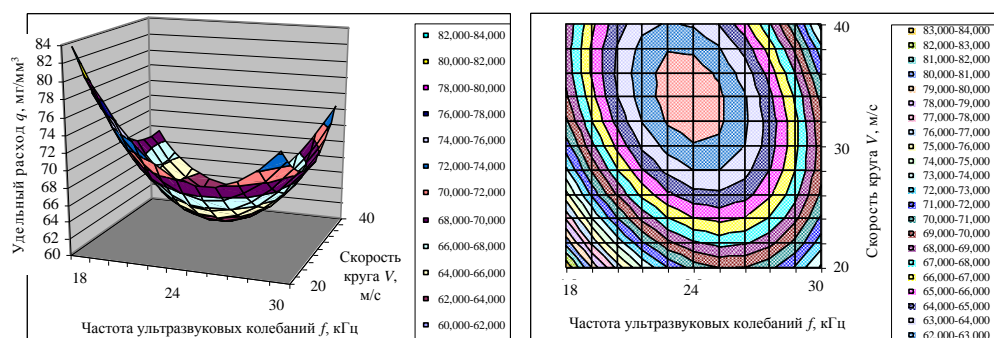
а



б

Рис. 8.9. Результаты оптимизации процесса алмазного шлифования СТМ (экспериментальный модуль экспертной системы):

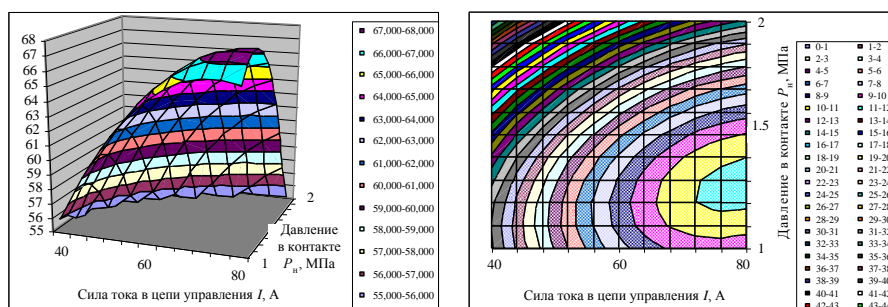
а – влияние частоты ультразвуковых колебаний и давления в контакте на удельную энергоёмкость процесса; б – влияние силы тока в цепи управления и давления в контакте на удельную энергоёмкость процесса



а

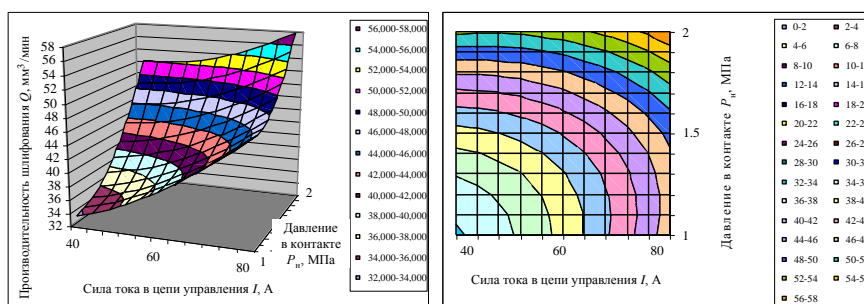
Рис. 8.10. Результаты оптимизации процесса шлифования СТМ (экспериментальный модуль экспертной системы):

а – влияние частоты ультразвуковых колебаний и скорости круга на удельный расход

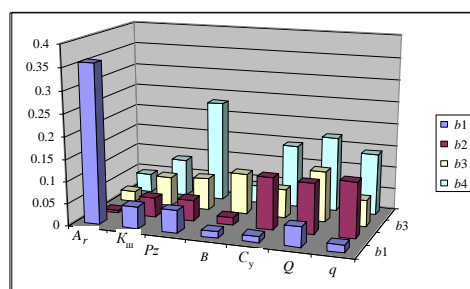


б

Рис. 8.10. Результаты оптимизации процесса шлифования СТМ (экспериментальный модуль экспертной системы) (продолжение):  
б – влияние силы тока в цепи управления и давления в контакте на удельный расход



а



б

Рис. 8.11. Результаты оптимизации процесса шлифования СТМ и ранжирование весового вклада факторов в эффективность процесса:

а – влияние силы тока в цепи управления и давления в контакте на производительность;  
б – весовой вклад факторов в выходные показатели процесса шлифования СТМ.

$A_r$  – относительная величина фактической площади контакта в системе «РПК–СТМ», %;

$K_{ш}$  – коэффициент шлифования;  $P_z$  – составляющая силы резания, Н;  $B$  – удельная энергоемкость, Дж/мм³;  $C_y$  – удельная себестоимость, коп/мм³;  $Q$  – производительность шлифования, мм³/мин;  $q$  – удельный расход алмазных зерен, мм³/мм³

Обрабатываемый материал	Оптимизируемый параметр	Скорость шлифования $V$ , м/с	Частота ультразвуковых колебаний, кГц	Нормальное давление $P$ , МПа	Ток в цепи управления $I$ , А	Алмазный круг		
						Марка зерна	Концентрация, %	Зернистость
Группа I	АСПК	$Q_{\max}$	30	2.5 – 3.0	80–100	АС32	25	50/40
	АСБ	$t_{p\max}$	–	3.0	50	АС15	50	50/40
		$q_{\min}$	24	2.0 – 2.5	50–80	АС32	15	50/40
Группа II	Ультрор-Р	$Q_{\max}$	30	1.5 – 2.0	60–80	АС32	25	100/80
		$t_{p\max}$	–	3.0	50	АС15	50	50/40
		$q_{\min}$	24	1.5 – 2.0	50–60	АС32	25	100/80
	Гексанит	$Q_{\max}$	24	1.0 – 1.5	50	АС32	50	160/125
		$t_{p\max}$	–	2.0	30	АС32	100	50/40
		$q_{\min}$	18	1.0 – 1.5	40	АС6	50	160/125
Группа III	ДИАП Диаметр	$Q_{\max}$	24	1.0 – 1.5	50	АС6	50	125/100
		$t_{p\max}$	–	2.0	30	АС32	100	50/40
		$q_{\min}$	18	1.0 – 1.5	40	АС6	50	125/100
Группа VI	ДШНБ	$Q_{\max}$	18	1.5 – 2.0	60–80	АС6	25	125/100
		$t_{p\max}$	–	3.0	50	АС32	50	50/40
		$q_{\min}$	18	1.5 – 2.0	40	АС6	25	125/100
	ВК-6	$Q_{\max}$	18	1.0 – 1.5	50	АС6	50	125/100
		$t_{p\max}$	–	1.5	20	АС32	100	50/40
		$q_{\min}$	18	1.0 – 1.5	40	АС6	50	125/100

Рис. 8.12. Рекомендуемые условия обработки СТМ

### Выводы

На базе комплексного теоретико-экспериментального изучения 3D топографии обрабатываемой поверхности и рабочей поверхности шлифовального круга методом лазерного сканирования, моделирования 3D напряженно-деформированного состояния системы «СТМ – зерно – связка» и динамики износа ее элементов разработана экспертная система процесса шлифования, позволяющая прогнозировать и оптимизировать процесс бездефектной обработки как существующих, так и вновь создаваемых сверхтвердых материалов. В экспертной системе использована процедурная база знаний.

Экспертная система состоит из двух взаимосвязанных модулей – теоретического и экспериментального. Теоретический и экспериментальный модули экспертной системы решают как самостоятельные задачи, так и дополняют друг друга. База данных экспертной системы содержит информацию по характеристикам алмазных кругов, физико-механическим свойствам различных марок алмазных зерен и обрабатываемых СТМ.

В теоретическом модуле в единую программу сведены расчеты взаимосвязанных процессов микроразрушения элементов единой системы «СТМ – зерно – связка», установленные в гл. 4. Теоретический модуль базируется на 3D моделировании НДС системы «СТМ – зерно – связка». В него входят следующие подсистемы: определения числа работающих зерен и фактической площади контакта; определения критической величины заделки алмазных зерен в связке, величины их заглубления в связку, объемов разрушенных СТМ и алмазных зерен; определения условий бездефектной обработки; расчета 3D НДС режущего клина лезвийного инструмента из СТМ в экстремальных условиях его эксплуатации для обеспечения надежности еще на стадии его изготовления; расчета процесса усталостно-циклического разрушения СТМ и алмазных зерен для определения производительности и удельного расхода; расчета производительности термоактивируемой доводки.

Разработанный теоретический модуль экспертной системы позволяет оценивать производительность шлифования, удельный износ, шероховатость обработанной поверхности в зависимости от марки СТМ, марки зерна, зернистости, концентрации, нормального давления, скорости шлифования, фактической площади контакта и относительной опорной площади РПК. Используя теоретический модуль экспертной системы, можно для каждой пары

«марка зерна – марка СТМ» определить величину нормального давления или поперечной подачи, при которых происходит трансформация процесса из производительного в прецизионный. Так, для пары «АСПК – АС6»  $P_n = 2$  МПа, а для «АСПК – АС2»  $P_n = 1.8$  МПа.

На основе результатов широких экспериментальных исследований с применением методов многофакторного планирования получены уравнения регрессии, описывающие зависимость выходных показателей ультразвукового алмазного шлифования различных СТМ от режимов шлифования, управления параметрами РПК и характеристик алмазных кругов, являющиеся основой для формирования целевых функций. На базе целевых функций разработан экспериментальный модуль экспертной системы управляемого процесса алмазного шлифования СТМ, позволяющий оптимизировать процесс по производительности, удельному расходу себестоимости обработки, качеству граней, режущей кромки затачиваемого инструмента из различных СТМ и радиусу ее округления.

Доказана и реализована возможность осуществления производительной и прецизионной обработки одним и тем же кругом, в том числе и крупнозернистым, за счет целенаправленной трансформации процесса от взаимного хрупкого микроразрушения элементов системы «СТМ – связка» до термоактивируемых диффузионных съемов при контакте с металлической связкой на основе железа. Сформулировано и доказано положение о необходимости и возможности совмещения термодоводочной и контрольной операций при изготовлении лезвийного инструмента из СТМ путем осуществления обработки при термосиловых нагрузках, превышающих создаваемые в экстремальных условиях его эксплуатации.

Стойкостные испытания лезвийного инструмента из СТМ, изготовленных в предложенных условиях, показали их эффективность и надежность. При этом установлено, что определяющим параметром оценки качества обработанной поверхности является не традиционно применяемые параметры шероховатости  $Ra$  и  $Rz$ , а относительная опорная площадь обработанной поверхности, измеряемая методом лазерного сканирования.

Определены пути повышения эффективности управляемого процесса алмазного шлифования СТМ. Для повышения производительности шлифования СТМ следует уменьшать величину относительной фактической площади контакта в системе «РПК – СТМ», для прецизионного (доводочного) – увеличивать.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аврутин Ю. Д. Рельеф шлифовального круга и его связь с шероховатостью шлифованной поверхности: Автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.03.01. – Л., 1977. – 23 с.
2. Алмаз: Справочник / Федосеев Д. В., Новиков Н. В., Вишневский А. С. и др. – Киев: Наук. думка, 1981. – 76 с.
3. Алмазная обработка технической керамики / Д. Б. Ваксер, В. А. Иванов, Н. В. Никитков, В. Б. Рабинович. – Л.: Машиностроение, 1976. – 160 с.
4. Алмазное шлифование хрупких материалов кругами с ориентированным расположением зерен / Зайцев А. Г., Старов В. Н., Скрипченко В. Г., Фоменко В. П. // Межвуз. сб. науч. тр. Пенз. политехн. ин-та. – Пенза, 1982. – Вып. 11. – С. 33–35.
5. Апанасенко В. И. Выбор режимов шлифования твердых и хрупких материалов, исходя из требуемой чистоты поверхности: Дис... канд. техн. наук: 05.02.08. – Орджоникидзе, 1972. – 212 с.
6. Анизотропия обрабатываемости монокристаллов / Карбань В. И., Рогов В. В., Карбань А. И., Соколенко В. С., Шмарин В. М., Шиняева И. П., Горпенко В. И. // Сверхтвердые материалы. – 1981. – № 2. – С. 14–17.
7. Ардамацкий А. Л. Алмазная обработка оптических деталей. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978. – 232 с.
8. А.с. 1422095 СССР, МКИ G 01 N 3/30, 3/06. Устройство для ударных испытаний материалов / Н. В. Новиков, А. П. Маслов, Ю. Ф. Матяш, Л. Н. Девин, А. М. Боярунас, В. Ф. Дрожин, В. Л. Доброскок (СССР) – № 4185598/25–28; Заявлено 26.01.87; Оpubл. 07.09.88, Бюл. № 33. – 2 с. ил.
9. А.с. 982872 СССР, МКИ В24 В 1/00. Способ шаржирования поверхностей / Л. А. Сагарда, В. В. Маковецкий (СССР). Оpubл. 1982, Бюл. № 47. – 3 с.
10. Байкалов А. К. Введение в теорию шлифования материалов. – К.: Наукова думка, 1978. – 207 с.

**Примечание [V491]:** {N1 <> aN758} Аврутин Ю.Д. Рельеф шлифовального круга и его связь с шероховатостью шлифованной поверхности: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Л, 1977. - 23 с. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:54:39}

**Примечание [V492]:** {N2 <> aN3063} Алмаз : Справочник / Д.В. Федосеев, Н.В. Новиков, А.С. Вишневский и др. - Киев: Наук. думка, 1981. - 76 с. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:54:39}

**Примечание [V493]:** {N3 <> aN3181} Алмазная обработка технической керамики / Д.Б. Ваксер, В.А. Иванов, Н.В. Никитков, В.Б. Рабинович. - Л.: Машиностроение, 1976. - 160 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:08}

**Примечание [V494]:** {N64 <> aN24} Зайцев А.Г., Старов В.Н., Скрипченко В.Г., Фоменко В.П. Алмазное шлифование хрупких материалов кругами с ориентированным расположением зерен // Межвуз. сб. науч. тр. Пенз. политехн. ин-та. Вып. 11. - Пенза: 1982. С. 33-35. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:54:55}

**Примечание [V495]:** {N4 <> aN3183} Апанасенко В.И. Выбор режимов шлифования твердых и хрупких материалов, исходя из требуемой чистоты поверхности: Дис... канд. техн. наук: 05.02.08. - Орджоникидзе, 1972. - 212 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:08}

**Примечание [V496]:** {N77 <> aN3025} Карбань В.И., Рогов В.В., Карбань А.И., Соколенко В.С., Шмарин В.М., Шиняева И.П., Горпенко В.И. Анизотропия обрабатываемости монокристаллов // Сверхтвердые материалы. - 1981. - № 2. - С. 14-17. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:25}

**Примечание [V497]:** {N180 <> aN247} Устройство для ударных испытаний материалов: А.с. 1422095 СССР, МКИ G 01 N 3/30, 3/06. / Н.В. Новиков, А.П. Маслов, Ю.Ф. Матяш, Л.Н. Девин, А.М. Боярунас, В.Ф. Дрожин, В.Л. Доброскок. № 4185598/25-28; Заявлено 26.01.87; Оpubл. 07.09.88, Бюл. № 33. - 2 с. ил. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:12}

**Примечание [V498]:** {N166 <> aN3165} Способ шаржирования поверхностей: А.с. 982872 СССР, МКИ В 24 В 1/00. / Л.А. Сагарда, В.В. Маковецкий; Оpubл. 1982, Бюл. № 47. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:04}

**Примечание [V499]:** {N6 <> aN5} Байкалов А.К. Введение в теорию шлифования материалов. - К.: Наукова думка, 1978. - 207 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:09}

11. Бакуль В. Н. Поликристаллические сверхтвердые материалы // Синтетические алмазы. – 1975. – № 4. – С. 17–22.

12. Бакуль В. Н., Цыпин Н. В., Гаргин В. Г. Взаимодействие алмаза с расплавами металлов в условиях изготовления инструментов. – В кн.: Адгезия расплавов. – К.: Наук. думка. – 1974. – С. 134–136.

13. Беззубенко Н. К. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов: Дис... докт. техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 1996. – 468 с.

14. Беззубенко Н. К., Евдокимов А. Е. Напряжения, возникающие при микрорезании // Резание и инструм. – 1990. – № 43. – С. 56–63.

15. Беззубенко Н. К., Кобзарь Л. Е. Шероховатость обработанной поверхности при внутреннем алмазно-искровом шлифовании // Резание и инструмент. – 1983. – Вып. 30. – С. 26–29.

16. Биргер И. А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.

17. Бокучава Г. В. Трибология процесса шлифования. – Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1984. – 238 с.

18. Брок Д. Основы механики разрушения. – М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.

19. Будяк А. А., Кацай М. Я. Оценка качества шлифпорошков из синтетических алмазов с помощью обобщенного критерия термостойкости // Сверхтвердые материалы. – 1985. – № 3. – С. 33–35.

20. Булгаков В. Е., Золотов А. Б., Белый М. В. Полуитерационный метод решения пространственных краевых задач расчета сооружений // Строительная механика и расчет сооружений. – 1985. – № 6. – С. 38–40.

21. Бурмистров В. В. Научные основы надежности технологических систем алмазно-абразивной обработки технической керамики и ситаллов. – Самара: Диамант-Феникс, 2001. – 122 с.

22. Верещагин В. А., Журавлев В. В. Композиционные алмазосодержащие материалы и покрытия. – Минск: Навука, Техніка, 1991. – 208 с.

23. Верещагин Л. Ф. Синтетические алмазы и гидроэкструзия. – М.: Наука, 1982. – 328 с.

24. Верещагин Л. Ф., Калашников Я. А., Шалимов М. Д. О форме кристаллов алмаза в синтетических балассах // Докл. АН СССР. – 1974. – Том 217. – № 1. – С. 70–72.

**Примечание [V500]:** {N7 <> aN3108} Бакуль В.Н. Поликристаллические сверхтвердые материалы // Синтетические алмазы. - 1975. - № 4. - С. 17-22. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:09}

**Примечание [V501]:** {N9 <> aN1067} Беззубенко Н.К. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов: Дис... докт. техн. наук: 05.03.01. - Харьков, 1996. - 468 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:09}

**Примечание [V502]:** {N11 <> aN582} Беззубенко Н.К., Евдокимов А.Е. Напряжения, возникающие при микрорезании // Резание и инструм. - 1990. - № 43. - с. 56-63. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:09}

**Примечание [V503]:** {N12 <> aN771} Беззубенко Н.К., Кобзарь Л.Е. Шероховатость обработанной поверхности при внутреннем алмазно-искровом ...

**Примечание [V504]:** {N13 <> aN773} Биргер И.А. Остаточные напряжения. - М.: Машгиз, 1963. - 232 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:10}

**Примечание [V505]:** {N14 <> aN280} Бокучава Г.В. Трибология процесса шлифования. - Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1984. - 238 с. {Auto: Date ...}

**Примечание [V506]:** {N18 <> aN3071} Брок Д. Основы механики разрушения. - М.: Высшая школа, 1980. - 368 с. {Auto: Date 03/09/02 Time ...}

**Примечание [V507]:** {N19 <> aN3023} Будяк А.А., Кацай М.Я. Оценка качества шлифпорошков из синтетических алмазов с помощью обобщенного ...

**Примечание [V508]:** {N20 <> aN3184} Булгаков В.Е., Золотов А.Б., Белый М.В. Полуитерационный метод решения пространственных краевых ...

**Примечание [V509]:** {N21 <> aN3195} Бурмистров В.В. Научные основы надежности технологических систем алмазно-абразивной обработки технич ...

**Примечание [V510]:** {N22 <> aN666} Верещагин В.А., Журавлев В.В. Композиционные алмазосодержащие материалы и покрытия. - Минск: Наву ...

**Примечание [V511]:** {N23 <> aN3313} Верещагин Л.Ф. Синтетические алмазы и гидроэкструзия. - М.: Наука, 1982. - 328 с. {Auto: Date 03/09/02 Tim ...}

**Примечание [V512]:** {N24 <> aN3322} Верещагин Л.Ф., Калашников Я.А., Шалимов М.Д. О форме кристаллов алмаза в синтетических ...



25. Витвицкий П. М., Попина С. Ю. Прочность и критерии хрупкого разрушения стохастически дефектных тел.–К.: Наук. думка, 1980. – 186 с.
26. Вишневский А. С., Лысенко А. В., Пименкевич А. Н. О некоторых микродефектах в синтетических алмазах // Синтетические алмазы. – 1977. – Вып. 2. – С. 23–28.
27. Влияние дефектности поверхности синтетических алмазов на их динамическую прочность / Невструев Г. Ф., Маль В. И., Ильницкая Г. Д., Лысаковский В. С. // Сверхтвердые материалы. – 1989. – № 1. – С. 19–21.
28. Власов В.И. Оптимальная твердость связки алмазных шлифовальных кругов // Алмазы и сверхтвердые материалы. – 1976.– Вып. № 2. – С. 15–20.
29. Внуков Ю. Н., Грабченко А. И. Физические представления о трении и износе инструментальных материалов для режущих инструментов «Muszaki Folyoirata» Ungarn, 1995 (венгр.)
30. Внуков Ю. Н., Дюбнер Л., Пансков А. Виды трения и износа при точении инструментами с покрытиями // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сб. – Харьков: ХГПУ, 1998. – Вып. 52. – С. 261–268.
31. Воронков В. И. Высокопроизводительное шлифование быстрорежущих сталей кругами из гексанита и эльбора: Автореф. дис... канд. техн. наук 05.03.01 – Саратов, 1986. – 25 с.
32. Высокопрочные шлифпорошки из синтетических алмазов марок АС50, АС65, АС80 / Артюхов В. П., Боримский А. И., Никитин Ю. И. и др. // Сверхтвердые материалы. – 1988. – № 2. – С. 29–31.
33. Голубев И. В. Круглое наружное шлифование со стабилизацией режущей способности токопроводящего инструмента электрическими разрядами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.03.01 – М., 1985. – 16 с.
34. Грабченко А. И. Научные основы алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов: Диссертация в форме научного доклада докт. техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 1995. – 59 с.
35. Грабченко А. И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. – Харьков: Вища шк., 1985. – 184 с.
36. Грабченко А. И. Хрупкое макроразрушение синтетических поликристаллов алмаза в процессе шлифования // Резание и инструмент. – 1978. – Вып. 19. – С. 134–140.

**Примечание [V513]:** {N26 <> aN3297} Витвицкий П.М., Попина С.Ю. Прочность и критерии хрупкого разрушения стохастически дефектных тел. - К.: Наук. думка, 1980. - 186 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:12}

**Примечание [V514]:** {N27 <> aN3162} Вишневский А.С., Лысенко А.В., Пименкевич А.Н. О некоторых микродефектах в синтетических алмазах // Синтетические алмазы. - 1977. - Вып. 2. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:12}

**Примечание [V515]:** {N111 <> aN3010} Невструев Г.Ф., Маль В.И., Ильницкая Г.Д., Лысаковский В.С. Влияние дефектности поверхности синтетических алмазов на их динамическую прочность // Сверхтвердые материалы. - 1989. - № 1. С. 19-21. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:12}

**Примечание [V516]:** {N28 <> aN3166} Власов В.И. Оптимальная твердость связки алмазных шлифовальных кругов // Алмазы и сверхтвердые материалы. - 1976. Вып. № 2. - С. 15-20. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:12}

**Примечание [V517]:** {N29 <> aN1085} Внуков Ю.Н., Грабченко А.И. Физические представления о трении и износе инструментальных материалов для режущих инструментов "Muszaki Folyoirata" Ungarn, 1995 (венгр.)

**Примечание [V518]:** {N30 <> aN1085} Внуков Ю.Н., Дюбнер Л., Пансков А. Виды трения и износа при точении инструментами с покрытиями // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сб. – Харьков: ХГПУ, 1998. – Вып. 52. – С. 261–268.

**Примечание [V519]:** {N5 <> aN3011} Артюхов В.П., Боримский А.И., Никитин Ю.И., Уман С.М., Бирман З.М., Ковтушенко В.С., Манжар В.А. Высокопрочные шлифпорошки из синтетических алмазов марок АС50, АС65, АС80

**Примечание [V520]:** {N32 <> aN790} Голубев И.В. Круглое наружное шлифование со стабилизацией режущей способности токопроводящего инструмента электрическими разрядами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.03.01 – М., 1985. – 16 с.

**Примечание [V521]:** {N34 <> aN798} Грабченко А. И. Научные основы алмазного шлифования сверхтвердых поликристаллических материалов: Диссертация в форме доклада докт. техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 1995. – 59 с.

**Примечание [V522]:** {N36 <> aN284} Грабченко А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. - Харьков: Вища шк., 1985. - 184 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:12}

**Примечание [V523]:** {N37 <> aN16} Грабченко А.И. Хрупкое макроразрушение синтетических поликристаллов алмаза в процессе шлифования // Резание и инструмент. – 1978. – Вып. 19. – С. 134–140.



37. Грабченко А. И., Магазеев М. Г., Мамалис А. Сравнительные стойкостные испытания алмазных резцов, заточенных комбинированным методом // Високі технології в машинобуд.: Зб. наук. пр. ХДПУ. – Х.: ХДПУ, 1998. – С. 82–85.

38. Грабченко А. И., Федорович В. А., Алексеев К. М. Физическое и математическое моделирование обрабатываемости СТМ // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков, – 1994. – Вып. 49. – С. 18–22.

39. Грабченко А. И., Русанов В. В. Высокоэффективный комбинированный метод шлифования синтетических сверхтвердых материалов совместно со сталью // Резание и инструмент. – 1978. – Вып. 19. – С. 131–133.

40. Грабченко А. И., Федорович В. А. Экспертная система процесса алмазного шлифования сверхтвердых материалов // Сб. науч. тр. Института сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины. Серия Г: Процессы механической обработки, станки и инструменты. – Киев, – 2002. – С. 481–489.

41. Грабченко А. И., Федорович В. А. Влияние анизотропии свойств кристаллитов на процесс взаимного разрушения элементов системы «СТПМ-зерно» при шлифовании // Мат. межд. научн.-техн. конф. «Сверхтвердые инструментальные материалы на рубеже тысячелетий: получение, свойства, применение» (СТИМ-2001). – Киев: ИСМ НАН Украины. – 2001. – С. 160 – 163.

42. Грабченко А. И., Ходоревский М. Г., Синельников А. Н. Исследование состояния поверхности алмазов АСБ, АСПК методом оптической микроскопии с применением органических реплик // Резание и инструмент. – 1974. – Вып. 11. – С. 141–144.

43. Графитизация алмазных порошков при высоких температурах / Федосеев Д. В., Внуков С. П., Буховец В. Л., Аникин Б. А. // Докл. АН СССР. – Т. 279. – 1984. – № 1. – С. 149–153.

44. Григорьев О. Н., Мильман Ю. В., Панченко Э. Л. Прочность и разрушение зерен синтетических алмазов // Физика разрушения. Тез. док. IV. Всесоюзная конф. – Киев: ИПМ АН УССР. – 1980. – Т. 2. – С. 57–62.

45. Григорьев О. Н., Мильман Ю. В., Трефилов В. И. Разрушение алмаза при локальном нагружении // Алмазы и сверхтвердые материалы. – 1980. – № 3. – С. 30–34.

**Примечание [V524]:** {N38 <> aN710} Грабченко А.И., Магазеев М.Г., Мамалис А. Сравнительные стойкостные испытания алмазных резцов, заточенных комбинированным методом // Високі технології в машинобуд.: Зб. наук. пр. ХДПУ. – Х.: ХДПУ, 1998. – С. 82-85. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:14}

**Примечание [V525]:** {N41 <> aN802} Грабченко А.И., Русанов В.В. Высокоэффективный комбинированный метод шлифования синтетических сверхтвердых материалов совместно со сталью // Резание и инструмент. 1978. Вып. 19. с. 131-133. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:14}

**Примечание [V526]:** {N44 <> aN3247} Грабченко А.И., Федорович В.А. Экспертная система процесса алмазного шлифования сверхтвердых материалов // Сб. науч. тр. Института сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля НАН Украины. Серия Г: Процессы механической обработки, станки и инструменты. – Киев, 2002. С.481–489. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:54:48}

**Примечание [V527]:** {N43 <> aN3044} Грабченко А.И., Федорович В.А. Влияние анизотропии свойств кристаллитов на процесс взаимного разрушения элементов системы "СТПМ-зерно" при шлифовании // Мат. межд. научн.-техн. конф. "Сверхтвердые инструментальные материалы на рубеже тысячелетий: получение, свойства, применение" (СТИМ-2001). – Киев: ИСМ НАН Украины. – 2001. – С. 160-163. {A...

**Примечание [V528]:** {N43 <> aN3186} Грабченко А.И., Ходоревский М.Г., Синельников А.Н. Исследование состояния поверхности алмазов АСБ, АСПК методом оптической микроскопии с применением органических реплик // Резание и инструмент. – Харьков: Вища школа. ...

**Примечание [V529]:** {N191 <> aN3191} Федосеев Д.В., Внуков С.П., Буховец В.Л., Аникин Б.А. Графитизация алмазных порошков при высоких температурах // Докл. АН СССР. – 1984. – Т. 279. – № 1. – С. 149-153. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:18}

**Примечание [V530]:** {N45 <> aN3161} Григорьев О.Н., Мильман Ю.В., Панченко Э.Л. Прочность и разрушение зерен синтетических алмазов // Физика разрушения. Тез. док. IV. Всесоюзная конф. – Киев: ИПМ АН УССР. – 1980. – Т. 2. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:15}

**Примечание [V531]:** {N46 <> aN3056} Григорьев О.Н., Мильман Ю.В., Трефилов В.И. Разрушение алмаза при локальном нагружении // Алмазы и сверхтвердые материалы. – 1980. – № 3. – С. 30-34. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:15}

46. Григорьева Л. Ф. Влияние некоторых физико-механических свойств кристаллов на процесс шлифовки // Инженерно-физический журнал. – 1960. – № 2. – С. 36 – 40.

47. Гусева Л. Ю. Автоматизация создания режущего микропрофиля на вершинах зерен крупнозернистых алмазных кругов // Российский научно-технический журнал «Инструмент и технологии» – 2000. – Вып. 1. – С.20 – 21.

48. Девин Л. Н. Определение предела прочности при растяжении поликристаллических сверхтвердых материалов // Сверхтвердые материалы. – 1988. – № 2. – С. 24 – 28.

49. Девин Л. Н., Вильгельм М. Прогнозирование вероятности разрушения резцов из поликристаллов на основе КНБ // Сверхтвердые материалы. – 1992. – № 6. – С. 41 – 46.

50. Девин Л. Н., Романенко В. В. К определению трещиностойкости композитов на основе твердого сплава // Сверхтвердые материалы. – 1982. – № 2. – С. 33 – 37.

51. Демкин Н. Б. Контактное шлифование шероховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. – 227 с.

52. Децки Иван. Изучение износа алмазных и эльборовых шлифовальных кругов при помощи поляризованного микроскопа // Национальна науч.-техн. конф. с международно участие по приложению на инструменте об синтетически диаманти и други сверхтвърди материали в народно стопанство (Габрово, 20–23 окт. 1976): Тез. докл. Габрово. – 1976. – С. 212–219.

53. Динамика удара: Пер. с англ. / Зукас Дж. А., Николас Т., Свифт Х. В., Джонсон В.Л. и др. – М.: Мир, 1985. – 296 с.

54. Доброскок В. Л. Наукові основи формоутворення робочої поверхні кругів на токопровідних зв'язках у процесі шліфування: Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Нац. тех. Ун-т «ХПІ». – Х., 2001. – 33 с.

55. Доброскок В. Л. Научные основы формирования рабочей поверхности кругов на токопроводных связках в процессе шлифования: Дис...докт. техн. наук: 05.03.01 – Харьков, 2001. – 447 с.

56. Доброскок В. Л. Повышение стабильности процесса шлифования путем управления рельефом рабочей поверхности алмазных кругов: Дис... канд. техн. наук 05.03.01 – Ростов-на-Дону, 1986. – 253 с.

57. Доброскок В. Л. Система 3D моделирования абразивных инструментов из сверхтвердых материалов // Мат. межд. научн.-техн. конф. «Сверхт-

**Примечание [V532]:** {N47 <> aN3064} Григорьева Л.Ф. Влияние некоторых физико-механических свойств кристаллов на процесс шлифовки // Инженерно-физический журнал. - 1960. - № 2. - С. 36-40. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:16}

**Примечание [V533]:** {N48 <> aN3000} Гусева Л.Ю. Автоматизация создания режущего микропрофиля на вершинах зерен крупнозернистых алмазных кругов // Российский научно-технический журнал "Инструмент и технологии" - 2000. Вып. 1. С. 20-21. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:54:49}

**Примечание [V534]:** {N49 <> aN3005} Девин Л.Н. Определение предела прочности при растяжении поликристаллических сверхтвердых материалов // Сверхтвердые материалы. - 1988. - № 2. - С. 24-28. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:16}

**Примечание [V535]:** {N50 <> aN3128} Девин Л.Н., Вильгельм М. Прогнозирование вероятности разрушения резцов из поликристаллов на основе КНБ // Сверхтвердые материалы...

**Примечание [V536]:** {N51 <> aN3168} Девин Л.Н., Романенко В.В. К определению трещиностойкости композитов на основе твердого сплава // Сверхтвердые материалы. - 1982. - № ...

**Примечание [V537]:** {N52 <> aN3041} Демкин Н.Б. Контактное шлифование шероховатых поверхностей. - М.: Наука, 1970. - 227 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:17}

**Примечание [V538]:** {N53 <> aN3187} Децки Иван. Изучение износа алмазных и эльборовых шлифовальных кругов при помощи поляризованного микроскопа // Национальна науч.-...

**Примечание [V539]:** {N54 <> aN550} Динамика удара: Пер. с англ. / Зукас Дж. А., Николас Т., Свифт Х.В., Джонсон В.Л. и др. - М.: Мир, 1985. - 296 с. {Auto: Date 03/09/02 Time ...}

**Примечание [V540]:** {N55 <> aN1021} Доброскок В.Л. Наукові основи формоутворення робочої поверхні кругів на токопровідних зв'язках у процесі шліфування: Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Нац. тех. Ун-т «ХПІ». – Х., 2001. – 33 с.

**Примечание [V541]:** {N56 <> aN3130} Доброскок В.Л. Научные основы формирования рабочей поверхности кругов на токопроводных связках в процессе шлифования: Дис... канд. техн. наук 05.03.01 – Харьков, 2001. – 447 с.

**Примечание [V542]:** {N57 <> aN153} Доброскок В.Л. Повышение стабильности процесса шлифования путем управления рельефом рабочей поверхности алмазных кругов: Дис... канд. техн. наук 05.03.01 – Ростов-на-Дону, 1986. – 253 с.

вердые инструментальные материалы на рубеже тысячелетий: получение, свойства, применение» (СТИМ-2001). – Киев: ИСМ НАН Украины, 2001. – С. 221–222.

58. Драевский А. И. Формирование композиционных абразивных материалов инструментального назначения с эндотермическими свойствами: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.02.01 / Запорож. гос. техн. Ун-т. – Запорожье, 1995. – 21 с.

59. Дуб С. Н., Эпштейн В. М., Никифоров Г. С. Механические свойства поликристаллического алмаза // Сверхтвердые материалы. – 1993. – №2. – С. 18–21.

60. Дятлов Ю. А. Напряжения в алмазном режущем элементе в зависимости от его ориентации и геометрии заточки // Сверхтвердые материалы. – 1994. – № 1. – С. 38–43.

61. Епифанов В. И., Аптекман А. А. Принцип автоматизации процесса распиливания кристаллов алмаза // Алмазы и сверхтвердые материалы. – 1979. – Вып. 9. – С. 10–11.

62. Епифанов В. И., Песина А. Я., Зыков Л. В. Технология обработки алмазов в бриллианты. – М.: Высш. шк., 1984. – 319 с.

63. Ефимов Ю. Н., Сапожников Д. Б. Реализация методов конечных элементов на ЭВМ для решения плоской задачи теории упругости. // Известия Всесоюз. науч.-иссл. ин. гидротехники. – 1970. – Т. 93. – С. 81–101.

64. Зависимость коэффициента теплопроводности поликристаллических сверхтвердых материалов от температуры / Грабченко А. И., Мацевитый Ю. М., Лушпенко С. Д., Островерх Е. В. // Сверхтверд. матер. – 1986. – № 1. – С. 24–28.

65. Зубарь В. П., Крюков В. К., Алмосов В. В. Исследование особенностей трения синтетических поликристаллических алмазов с конструкционными материалами // Резание и инструмент. – Харьков: ХПИ, 1975. – Вып. 13. – С. 54–58.

66. Зубков В. М., Семенова-Тянь-Шанская А. С., Епишина Н. И. Микротвердость и плотность дислокации кристаллов алмаза // Алмазы. – 1969. – Вып. 1. – С. 5–7.

67. Иванова В. С. Усталость и хрупкость металлических материалов. – М.: Наука, 1968. – 310 с.

**Примечание [V543]:** {N58 <> aN1006} Доброскок В.Л. Система 3D моделирования абразивных инструментов из сверхтвердых материалов // Мат. межд. научн.-техн. конф. "Сверхтвердые инструментальные материалы на рубеже тысячелетий: получение, свойства, применение" (СТИМ-2001). - Киев: ИСМ НАН Украины, 2001. - С. 221-222. {Auto: D ...}

**Примечание [V544]:** {N59 <> aN5021} Драевский А.И. Формирование композиционных абразивных материалов инструментального назначения с эндотермическими свойствами: Автореф. дис... канд. техн. ...

**Примечание [V545]:** {N59 <> aN3236} Дуб С.Н., Эпштейн В.М., Никифоров Г.С. Механические свойства поликристаллического алмаза // Сверхтвердые материалы. - 1993. - №2. - С. 18-21. {Auto: Date 02/09/02 Time ...}

**Примечание [V546]:** {N61 <> aN3065} Дятлов Ю.А. Напряжения в алмазном режущем элементе в зависимости от его ориентации и геометрии заточки // Сверхтвердые материалы. - 1994. - № 1. - С. 38-43. ...

**Примечание [V547]:** {N61 <> aN3189} Епифанов В.И., Аптекман А.А. Принцип автоматизации процесса распиливания кристаллов алмаза // Алмазы и сверхтвердые материалы. - 1979. Вып. 9. - С. 10-11. {Auto: Date ...}

**Примечание [V548]:** {N63 <> aN3061} Епифанов В.И., Песина А.Я., Зыков Л.В. Технология обработки алмазов в бриллианты. - М.: Высш. шк., 1984. - 319 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:20}

**Примечание [V549]:** {N40 <> aN620} Грабченко А.И., Мацевитый Ю.М., Лушпенко С.Д., Островерх Е.В. Зависимость коэффициента теплопроводности поликристаллических сверхтвердых материалов от ...

**Примечание [V550]:** {N66 <> aN3314} Зубарь В.П., Крюков В.К., Алмосов В.В. Исследование особенностей трения синтетических поликристаллических алмазов с конструкционными материалами ...

**Примечание [V551]:** {N67 <> aN3110} Зубков В.М., Семенова-Тянь-Шанская А.С., Епишина Н.И. Микротвердость и плотность дислокации кристаллов алмаза // Алмазы. - 1969. Вып. 1. - С. 5-7. {Auto ...}

**Примечание [V552]:** {N68 <> aN3156} Иванова В.С. Усталость и хрупкость металлических материалов. М.: Наука, 1968. - 310 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:22}

68. Износостойкость алмазных зерен при микрорезании титанового сплава ВТ8 / **Н. И. Богомолов, Н.В.** Есаулов Г. И., Саютин В. Г. и др. // Сверхтвердые материалы. – 1980. – № 4. – С. 43–44.

69. Инструменты из сверхтвердых материалов: Учебное пособие / Под ред. Н. В. Новикова. – Киев: ИСМ НАНУ, 2002. – 528 с.

70. Исследование процесса окисления синтетических и природных алмазов Бакуль В. Н., Шульженко А. А., Крук В. Б., Гетьман А. Ф. // Синтетические алмазы. – 1976. – Вып. 2. – С. 3–5.

71. Использование электроэрозии для обработки сверхтвердых материалов и режущей керамики / Грабченко А. И., Пыжов И. Н., Магазеев М. Г., Грибовски Л. // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.–техн. сб. – Харьков: ХГПУ. – 1993. – Вып. 47. – С. 65–70.

72. Изменения, происходящие в алмазах при изготовлении и эксплуатации алмазных буровых инструментов / Цыпин Н. В., Симкин Э. С., Тумас Б. Ю., Гаргин В. Г. // Синтетические алмазы – ключ к техническому прогрессу. – Киев: Наук. думка, – 1977. – Т. 1. С. 64–68.

73. Исследование распространения усталостных трещин в монокристаллах синтетических алмазов / Новиков Н. В., Примаков Л. П., Майстренко А. Л., Ващенко А. Д. // ДАН СССР. – 1981. – Вып. 256. – №5. – С. 1122–1126.

74. Инверсия структурной приспособляемости в процессах финишной алмазной обработки / Костецкий Б. И., Шульман А. П., Ляшко В. А., Носовский И. Г. // Синтетические алмазы – ключ к техническому прогрессу. – Киев, 1977. – Ч. 1. – С. 273–279.

75. Кабалдин Ю. Г. Структура, прочность и износостойкость композиционных инструментальных материалов. – Владивосток: Дальнаука, 1996. – 183 с.

76. Калафатова Л. П. Диагностика дефектности обработанной поверхности технических ситаллов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонГТУ, – 1997. – Вып. 4. – С.66–75.

77. Калафатова Л. П. Энергетический подход к повышению качества обработки хрупких неметаллических материалов // Труды Междунар. конф. «Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века». – Донецк: ДонГТУ, – 1998. – Том 2. – С. 27–30.

78. Калафатова Л. П., Богатырев В. А. Установление зависимости напряжений от сил резания при шлифовании хрупких неметаллических матери-

**Примечание [V553]:** {N68 <> aN819} Износостойкость алмазных зерен при микрорезании титанового сплава ВТ8 / Н.И. Богомолов, Н.В. Есаулов, Г.И. Саютин, В.Г. Саськов // Сверхтвердые материалы. - 1980. - № 4 с. 43-44. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:54:56}

**Примечание [V554]:** {N70 <> aN3311} Инструменты из сверхтвердых материалов: Учебное пособие / Под ред. Н.В. Новикова. - Киев: ИСМ НАНУ, 2002. - 528 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:22}

**Примечание [V555]:** {N8 <> aN3022} Бакуль В.Н., Шульженко А.А., Крук В.Б., Гетьман А.Ф. Исследование процесса окисления синтетических и природных алмазов // Синтетические алмазы. - 1976. Вып. 2. - С. 3-5. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:54:40}

**Примечание [V556]:** {N41 <> aN3060} Грабченко А.И., Пыжов И.Н., Магазеев М.Г., Грибовски Л. Использование электроэрозии для обработки сверхтвердых материалов и режущей керамики // Резание и

**Примечание [V557]:** {N199 <> aN3070} Цыпин Н.В., Симкин Э.С., Тумас Б.Ю., Гаргин В.Г. Изменения, происходящие в алмазах при изготовлении и эксплуатации алмазных буровых инструментов // Синтетическ

**Примечание [V558]:** {N122 <> aN3033} Новиков Н.В., Примаков Л.П., Майстренко А.Л., Ващенко А.Д. Исследование распространения усталостных трещин в монокристаллах синтетических алмазов // ДАН СССР. ...

**Примечание [V559]:** {N86 <> aN3037} Костецкий Б.И., Шульман А.П., Ляшко В.А., Носовский И.Г. Инверсия структурной приспособляемости в процессах финишной алмазной обработки // Синтетические алмазы - ...

**Примечание [V560]:** {N71 <> aN3174} Кабалдин Ю.Г. Структура, прочность и износостойкость композиционных инструментальных материалов. - Владивосток: Дальнаука, 1996. - 183 с. {Auto: Date 03/09/02 Tim ...}

**Примечание [V561]:** {N72 <> aN3295} Калафатова Л.П. Диагностика дефектности обработанной поверхности технических ситаллов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. - Донецк: ДонГТУ. - 1997. - Вып. 4. - ...

**Примечание [V562]:** {N72 <> aN3309} Калафатова Л.П. Энергетический подход к повышению качества обработки хрупких неметаллических материалов // Труды Междунар. конф. "Машиностроение и



алов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонГТУ, – 2000. – Вып. 10. – С. 92–99.

79. Калинин В. Д. Влияние скульптуры граней и дефектности низкосортных алмазов на их механические свойства // Алмазы. – 1972. – Вып. 1. – С. 1–3.

80. Караванов Ю. И. Выбор оптимальных условий резания полимерных материалов // Матер. Всесоюз. научно-техн. семин. «Обработка резанием новых конструкционных и неметаллических материалов». – М., 1973. – С. 160–174.

81. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Рыжов Э. В., Сагарда А. А., Ильицкий В. Б., Чеповецкий И. Х. – К.: Наук. думка, 1979. – 244 с.

82. Кизиков Э. Д., Верник Е. Б., Кошевой Н. С. Алмазно-металлические композиции. – К.: Техніка, 1988. – 136 с.

83. Киселева Л. Н. Технические алмазы. – М.: Недра, 1964. – 154 с.

84. Кисилев М. Г., Минченя В. Т. Применение ультразвука для формирования алмазоносного слоя на рабочей поверхности ограночных дисков //Инструментальний світ. – 2002. – № 1(13). – С. 30–31.

85. Козакова Н. В. Влияние прочности связки, алмазных зерен и их концентрации на работоспособность шлифовального круга // Високі технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2003. – Вип. 2(7). – С. 45–50.

86. Козакова Н. В., Наконечный Н. Ф., Федорович В. А. 3D моделирование при определении оптимальных характеристик алмазных кругов // Високі технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – Вип. 1(8). – С. 81–86.

87. Кольский Г., Рейдер Д. Волны напряжений и разрушение. – В кн.: Разрушение. – М., 1973. – Т. 1. – С. 570–608.

88. Контактная электризация в процессе распиливания кристаллов алмаза/ Бочаров А. М., Сысоев П. В., Миронов В. С., Климович А. Ф. // Алмазы и сверхтвердые материалы. – 1983. – Вып. 3. – С. 1–2.

89. Костецкий Б. И. Поверхностная прочность материалов при трении. – Киев.: Техніка, 1976. – 232 с.

90. Костецкий Б. И. Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении // Трение и износ. – 1985. – Том IV. – № 2. – С. 201–207.

**Примечание [V563]:** {N73 <> aN3298} Калафатова Л.П., Богатырев В.А. Установление зависимости напряжений от сил резания при шлифовании хрупких неметаллических материалов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. - Донецк: ДонГТУ. - 2000. - Вып. 10. С. 92-99. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:54:58}

**Примечание [V564]:** {N74 <> aN3180} Калинин В.Д. Влияние скульптуры граней и дефектности низкосортных алмазов на их механические свойства // Алмазы. - 1972. Вып. 1. - С. 1-3. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:54:58}

**Примечание [V565]:** {N75 <> aN3185} Караванов Ю.И. Выбор оптимальных условий резания полимерных материалов // Матер. Всесоюз. научно-техн. семин. "Обработка резанием новых

**Примечание [V566]:** {N78 <> aN398} Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Рыжов Э.В., Сагарда А.А., Ильицкий В.Б., Чеповецкий И.Х. - К.: Наук. думка, 19

**Примечание [V567]:** {N79 <> aN665} Кизиков Э.Д., Верник Е.Б., Кошевой Н.С. Алмазно-металлические композиции. - К.: Техніка, 1988. - 136 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:25}

**Примечание [V568]:** {N80 <> aN832} Киселева Л.Н. Технические алмазы. - М.: Недра, 1964. - 154 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:26}

**Примечание [V569]:** {N81 <> aN3245} Кисилев М.Г., Минченя В.Т. Применение ультразвука для формирования алмазоносного слоя на рабочей поверхности ограночных дис

**Примечание [V570]:** {N81 <> aN3239} Кольский Г., Рейдер Д. Волны напряжений и разрушение. - в кн.: Разрушение. М., 1973, т.1, с. 570-608. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:55:01}

**Примечание [V571]:** {N16 <> aN3125} Бочаров А.М., Сысоев П.В., Миронов В.С., Климович А.Ф. Контактная электризация в процессе распиливания кристаллов алмаза //

**Примечание [V572]:** {N83 <> aN3155} Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении. - Киев.: Техніка, 1976. - 232 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:27}

**Примечание [V573]:** {N84 <> aN3038} Костецкий Б.И. Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении // Трение и износ. - 1985. Том IV. - № 2. - С. 201-2

91. Костецкий Б. И., Беркладский Л. И. Структурная приспособляемость конструкционных материалов // Технология и организация производства. – 1974. – Вып. 4. – С. 13–14.
92. Костецкий Б. И., Татансон М. Э., Бершадский Л. И. Механо-химические процессы при граничном трении. – М.: Машиностроение, 1972. – 178 с.
93. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
94. Кулакова И. И., Руденко А. П. Скорости каталитического окисления различных граней алмаза // Журн. физ. хим. – 1974. – Т. XLV111. – Вып. 4. – С. 880–883.
95. Кумабэ Д. Вибрационное резание. Пер. с яп. С. Л. Масленникова / Под ред. И. И. Портнова, В. В. Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
96. Кундрак Я. Производство, применение и заточка лезвийных инструментов из сверхтвердых материалов (венг.) // Zaroszipozium Budapest. – 1991. – Р. 168–185.
97. Лаптев В. А., Нефедов П. В., Детчуев Ю. А. Влияние прочности и термостойкости монокристаллов алмаза на работоспособность инструмента // Сверхтвердые материалы. – 1987. – № 6. – С. 45–46.
98. Лейпунский О. И. Об искусственных алмазах. // Успехи химии. – 1939. – Вып. 8. – С. 1519–1534.
99. Лоладзе Т. Н. Износ режущего инструмента. – М.: Машгиз, 1958. – 355 с.
100. Лоладзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
101. Лоладзе Т. Н., Бокучава Г. В. Износ алмазов и алмазных кругов. – М.: Машиностроение, 1967. – 112 с.
102. Лоладзе Т. Н., Бокучава Г. В. К теории диффузионного износа алмазного абразивного инструмента // Тр. ВНИИАШ. – 1985. – № 5. – С. 103–112.
103. Локальные неоднородности электронной плотности и субструктура синтетического алмаза / Черемской П. Г., Гладких Л. И., Швецова З. И. и др. // Синтетические алмазы. – 1977. – Вып. 5. – С. 16–21.
104. Лысанов В. С. Эльбор в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1978. – 280 с.

**Примечание [V574]:** {N85 <> aN3164} Костецкий Б.И., Беркладский Л.И. Структурная приспособляемость конструкционных материалов // Технология и организация производства. - Киев. - 1974. Вып. 4. - С. 13-14. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:55:06}

**Примечание [V575]:** {N85 <> aN3171} Костецкий Б.И., Татансон М.Э., Бершадский Л.И. Механо-химические процессы при граничном трении. М.: Машиностроение, 1972. - 178 с. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:55:06}

**Примечание [V576]:** {N88 <> aN384} Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. - М.: Машиностроение, 1977. - 526 с. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:55:06}

**Примечание [V577]:** {N89 <> aN3066} Кулакова И.И., Руденко А.П. Скорости каталитического окисления различных граней алмаза // Журн. физ. хим. - 1974. - Т. XLV111. - Вып. 4. - С. 880-883. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:55:06}

**Примечание [V578]:** {N89 <> aN231} Кумабэ Д. Вибрационное резание: Пер. с яп. С.Л. Масленникова / Под ред. И.И. Портнова, В.В. Белова. - М.: Машиностроение, 1985. - 424 с. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:55:06}

**Примечание [V579]:** {N91 <> aN3147} Кундрак Я. Производство, применение и заточка лезвийных инструментов из сверхтвердых материалов (венг.) // Zaroszipozium Budapest. - 1991. - Р. 168-185. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:55:06}

**Примечание [V580]:** {N93 <> aN3197} Лаптев В.А., Нефедов П.В., Детчуев Ю.А. Влияние прочности и термостойкости монокристаллов алмаза на работоспособность инструмента // Сверхтвердые материалы. - 1987. - № 6. - С. 45-46. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:55:06}

**Примечание [V581]:** {N94 <> aN3315} Лейпунский О.И. Об искусственных алмазах. - Успехи химии, 1939, вып. 8, с.1519-1534. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:55:06}

**Примечание [V582]:** {N95 <> aN3250} Лоладзе Т.Н. Износ режущего инструмента. М., Машгиз, 1958 г. - 355 с. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:55:06}

**Примечание [V583]:** {N96 <> aN40} Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. - М.: Машиностроение, 1982. - 320 с. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:55:06}

**Примечание [V584]:** {N97 <> aN3085} Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В. Износ алмазов и алмазных кругов. - М.: Машиностроение, 1967. - 112 с. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:55:06}

**Примечание [V585]:** {N98 <> aN317} Лоладзе Т.Н., Бокучава Г.В. К теории диффузионного износа алмазного абразивного инструмента // Тр. ВНИИАШ. - 1985. - № 5. - С. 103-112. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:55:06}

**Примечание [V586]:** {N204 <> aN3024} Черемской П.Г., Гладких Л.И., Швецова З.И., Грабченко А.И., Красильников Е.В. Локальные неоднородности электронной плотности и субструктура синтетического алмаза / Синтетические алмазы. - 1977. - Вып. 5. - С. 16-21. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:55:06}

**Примечание [V587]:** {N99 <> aN656} Лысанов В.С. Эльбор в машиностроении. - Л.: Машиностроение, 1978. - 280 с. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:55:06}

105. Малышев В. И., Янюшкин Ю. М. Контактные температуры при алмазной правке шлифовальных кругов // Сверхтвердые материалы. – 1986. – № 5. – С. 48–54.
106. Манжар В. А. Оценка качества поликристаллов на основе алмаза // Инструментальный світ: Наук.-техн. Рекламно-інформаційний журнал. – Київ. – 2001. – №12. – С.27–28.
107. Марков А. И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов. – М.: Машиностроение, 1968. – 367 с.
108. Марков И. А. Ультразвуковая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.
109. Матюха П. Г. Научные основы стабилизации выходных показателей алмазного шлифования с помощью управляющих воздействий на рабочую поверхность круга: Дис....докт. техн. наук: 05.03.01. – Донецк, 1995. – 456 с.
110. Механизм абразивного износа и структура поверхности кристаллических материалов после абразивной обработки / Д. В. Лоцко, Ю. В. Мильман, Н. М. Торчун // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1984. – №8. – С. 136 – 141.
111. Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие: В 4 т./ Под общей редакцией Панасюка В. В. Т.2. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами: – Киев: Наук. думка, 1988. – 620 с.
112. Моделирование процесса ультразвуковой правки алмазных кругов / Федорович В. А., Хавин Г. Л., Палмиер Д., Шмитт М. // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2001. – Вып. 57. – С. 235–244.
113. Мечник В. А. О температурном критерии для оценки режущей способности алмазного круга // Изв. вузов. Машиностроение. – 1990. – № 6. – С. 91–95.
114. Миркин Л. И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. – М.: Металлургия, 1957. – 567 с.
115. Мишнаевский Л. Л. Износ шлифовальных кругов.– К: Наук. думка, 1982. – 192 с.
116. Механизм износа алмаза в правящих инструментах / Тхагапсоев Х. Г., Хапачев Б. С., Гукьямухов П. М., Гоов А. А., Хажуев В. Ш. // Алмазы и сверхтвердые материалы. – М.: НИИМАШ, 1979. – Вып. 1. – С. 9–11.

**Примечание [V588]:** {N100 <> aN574} Малышев В.И., Янюшкин Ю.М. Контактные температуры при алмазной правке шлифовальных кругов // Сверхтвердые материалы. - 1986. - № ...

**Примечание [V589]:** {N101 <> aN3238} Манжар В.А. Оценка качества поликристаллов на основе алмаза //Инструментальный світ.- Науково-технічний рекламно-інформаційний ...

**Примечание [V590]:** {N102 <> aN3251} Марков А.И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов. - М.: Машиностроение, 1968. - 367 с. {Auto: Date 03/09/02 Tim ...}

**Примечание [V591]:** {N103 <> aN41} Марков И.А. Ультразвуковая обработка материалов. - М.: Машиностроение, 1980. - 237 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:34}

**Примечание [V592]:** {N104 <> aN3310} Матюха П.Г. Научные основы стабилизации выходных показателей алмазного шлифования с помощью управляющих воздействий на рабочую ...

**Примечание [V593]:** {N105 <> aN3258} Механизм абразивного износа и структура поверхности кристаллических материалов после абразивной обработки / Д.В. Лоцко, Ю.В. Мильман, Н.М. ...

**Примечание [V594]:** {N106 <> aN3053} Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: В 4 т. / Под общей ред. Панасюка В.В. - Киев: Наук. думка, 1988. - Т.2: ...

**Примечание [V595]:** {N190 <> aN3035} Федорович В.А., Хавин Г.Л. Палмиер Д., Шмитт М. Моделирование процесса ультразвуковой правки алмазных кругов // Резание и инструм ...

**Примечание [V596]:** {N107 <> aN569} Мечник В.А. О температурном критерии для оценки режущей способности алмазного круга // Изв. вузов. Машиностроение. - 1990. - № 6 ...

**Примечание [V597]:** {N108 <> aN866} Миркин Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. - М.: Металлургия, 1957. - 567 с. {Auto: Date 03/09/02 Tim ...}

**Примечание [V598]:** {N109 <> aN44} Мишнаевский Л.Л. Износ шлифовальных кругов. - К.: Наукова думка, 1982. - 192 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:37}

**Примечание [V599]:** {N173 <> aN3007} Тхагапсоев Х.Г., Хапачев Б.С., Гукьямухов П.М., Гоов А.А., Хажуев В.Ш. Механизм износа алмаза в правящих инструментах // Алмазы и ...

117. Наконечный Н. Ф. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования кругами на металлических связках: Дис... канд. техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 1984. – 215 с.
118. Несмелов А. Ф. Алмазные инструменты в промышленности. – М.: Машиностроение, 1964. – 343 с.
119. Никитин Ю. И. Технология изготовления и контроль качества алмазных порошков. – К.: Наук. думка, 1984. – 264 с.
120. Никитин Ю. И., Белик В. Д. Исследование динамики разрушения алмазных шлифпорошков при свободном и стесненном ударах // Сверхтвердые материалы. – 1994. – № 4. – С. 48–52.
121. Новиков Н. В., Андросов И. М., Майстренко А. Л. Методика определения прочности и трещиностойкости поликристаллических сверхтвердых материалов // Сверхтвердые материалы. – 1982. – № 2. – С. 33–37.
122. Новиков Н. В., Воронин Г. А. Расчет напряженно-деформированного состояния кристаллов синтетических алмазов методом конечных элементов // Сверхтвердые материалы. – 1983. – № 1. – С. 13–16.
123. Новиков Н. В., Девин Л. Н., Шляев Д. В. Надежность лезвийного инструмента из КНБ в период приработки // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. пр. ХДПУ. – Х.: ХДПУ. – 1998. – С. 227–229.
124. Новиков Н. В., Дуб С. Н., Мальнев В. И. Трещиностойкость монокристаллов алмаза // Сверхтвердые материалы. – 1992. – № 5. – С. 6–11.
125. Некоторые свойства кубонита новой марки / Новиков Н. В., Кислый П. С., Шульженко А. А. и др. // Сверхтвердые материалы. – 1980. – № 3. – С. 17–18.
126. Новиков Н. В., Майстренко А. Л. Трещиностойкость кристаллических и композиционных сверхтвердых материалов // Сверхтвердые материалы. – 1985. – № 7. – С. 18–21.
127. Новиков Н. В., Майстренко А. Л., Кулаковский В. Н. Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1993. – 220 с.
128. Новиков Н. В., Шульженко А. А., Никитин Ю. И., Кацай М. Я., Уман С. М., Мельник В. И., Якименко Д. В. Термостойкие высокопрочные шлифпорошки синтетических алмазов // Сверхтвердые материалы. – 1984. – № 5. – С. 33–35.

**Примечание [V600]:** {N110 <> aN48} Наконечный Н.Ф. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования кругами на металлических связках: Дис... канд. техн. наук: 05.03.01. - Харьков, 1984. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:37}

**Примечание [V601]:** {N112 <> aN3327} Несмелов А.Ф. Алмазные инструменты в промышленности. - М.: Машиностроение, 1964. - 343 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:38}

**Примечание [V602]:** {N113 <> aN272} Никитин Ю.И. Технология изготовления и контроль качества алмазных порошков. - К.: Наук. думка, 1984. - 264 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:38}

**Примечание [V603]:** {N114 <> aN3073} Никитин Ю.И., Белик В.Д. Исследование динамики разрушения алмазных шлифпорошков при свободном и стесненном ударах // Сверхтвердые материалы. - 1994. - № 4. - С. 48-52. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:39}

**Примечание [V604]:** {N116 <> aN3059} Новиков Н.В., Воронин Г.А. Расчет напряженно-деформированного состояния кристаллов синтетических алмазов методом конечных элементов // Сверхтвердые материалы. - 1983. - № 1. - С. 13-16. {Auto: Date 03/09/02 Time ...}

**Примечание [V605]:** {N117 <> aN727} Новиков Н.В., Девин Л.Н., Шляев Д.В. Надежность лезвийного инструмента из КНБ в период приработки // Високі технології в машинобуд. Зб. наук. пр. ХДПУ. - Х.: ...

**Примечание [V606]:** {N118 <> aN3013} Новиков Н.В., Дуб С.Н., Мальнев В.И. Трещиностойкость монокристаллов алмаза // Сверхтвердые материалы. - 1992. - № 5. С. 6-11. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:40}

**Примечание [V607]:** {N119 <> aN3027} Новиков Н.В., Кислый П.С., Шульженко А. А. и др. Некоторые свойства кубонита новой марки // Сверхтвердые материалы. - 1980. - № 3. - С. 17-18. {Auto: Date 03/09/02 Time ...}

**Примечание [V608]:** {N120 <> aN3126} Новиков Н.В., Майстренко А.Л. Трещиностойкость кристаллических и композиционных сверхтвердых материалов // Сверхтвердые материалы. - 1985. - № 7. - С. 18-21. {Auto: Date ...}

**Примечание [V609]:** {N121 <> aN3057} Новиков Н.В., Майстренко А.Л., Кулаковский В.Н. Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов. - Киев: Наук. думка, 1993. - 220 с. {Auto: Date ...}



129. Новые сверхтвердые материалы за рубежом (Обзор) / Шульженко А. А., Гинзбург Б. И., Ховах Н. И., Прусс А. И. // Сверхтвердые материалы. – 1987. – № 1. – С. 23–28.

130. Новые возможности изучения параметров режущего рельефа алмазных кругов / Федорович В. А., Русанов В. В., Кавалец М., Янковяк М. // Высокие технологии, развитие и кадровое обеспечение: Сб. науч. тр. НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2001. – С. 214–222.

131. Напряжение в зоне контакта алмазного зерна с металлом / Беззубенко Н. К., Евдокимов А. Е., Сальтевский И. С. и др. // Резание и инструмент. – 1992. – № 45. – С. 101–108.

132. Новиков Н. В., Шульженко А. А. Новые сверхтвердые материалы и их применение в промышленности // Сверхтвердые материалы. – 1987. – № 5. – С. 9–14.

133. Образование искусственным путем алмаза типа баллас / Калашников Я. А., Верещагин Л. Ф., Фекличев Е. М. и др. // ДАН СССР. – 1967. – Т. 172. – № 1. – С. 76–78.

134. Курдюмов А. В., Олейник Г. С., Пилянкевич А. Н. и др. О начальных стадиях превращения графитоподобной модификации нитрида бора в сфалеритную // Сверхтвердые материалы. – 1984. – № 2. – С. 11–16.

135. О структуре поликристаллов нитрида бора после спекания под давлением. / Палатник Л. С., Гладких Л. И., Фукс М. Я. и др. // Синтетические алмазы. – 1976. – Вып. 1. – С. 66–69.

136. Окисление поликристаллов гексанита-Р различного фазового состава / Бочко А. В., Лавренко В. А., Примачук В. Л., Проценко Т. Г. // Сверхтвердые материалы. – 1986. – № 1. – С. 16–18.

137. Определение контактной температуры при правке абразивных кругов алмазным инструментом / Тхагапсоев Х. Г., Шхануков М. Х., Хапачев Б. С., Абретов М. Х. // Сверхтвердые материалы. – 1983. – № 4. – С. 44–48.

138. Определение вязкости разрушения сверхтвердых материалов и твердых сплавов при динамическом нагружении / Новиков Н. В. и др. // Сверхтвердые материалы. – 1979. – № 3. – С. 15–18.

139. Основы алмазного шлифования / Семко М. Ф., Грабченко А. И., Раб А. Ф., Узунян М. Д., Пивоваров М. С. – К.: Техника, 1978. – 192 с.

**Примечание [V610]:** {N209 <> aN3015} Шульженко А.А., Гинзбург Б.И., Ховах Н.И., Прусс А.И. Новые сверхтвердые материалы за рубежом (Обзор) // Сверхтвердые материалы. - 1987. - № 1. - С. 23-28. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:29}

**Примечание [V611]:** {N189 <> aN3087} Федорович В.А., Русанов В.В., Кавалец М., Янковяк М. Новые возможности изучения параметров режущего рельефа алмазных кругов // Высокие технологии, развитие и кадровое обеспечение. Сборник научных трудов НТУ "ХПИ". - Харьков: НТУ "ХПИ". - 2001. - С. 214-222. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:17}

**Примечание [V612]:** {N10 <> aN596} Беззубенко Н.К., Евдокимов А.Е., Сальтевский И.С. и др. Напряжение в зоне контакта алмазного зерна с металлом // Резание и инструм. - 1992. ...

**Примечание [V613]:** {N123 <> aN3014} Новиков Н.В., Шульженко А.А. Новые сверхтвердые материалы и их применение в промышленности // Сверхтвердые материалы. - 1987. - № ...

**Примечание [V614]:** {N124 <> aN3317} Образование искусственным путем алмаза типа баллас. Калашников Я.А., Верещагин Л.Ф., Фекличев Е.М. и др. // ДАН СССР, 1967. - Том 172, № 1. ...

**Примечание [V615]:** {N91 <> aN3109} Курдюмов А.В., Олейник Г.С., Пилянкевич А.Н. и др. О начальных стадиях превращения графитоподобной модификации нитрида бора в ...

**Примечание [V616]:** {N129 <> aN3320} Палатник Л.С., Гладких Л.И., Фукс М.Я. и др. О структуре поликристаллов нитрида бора после спекания под давлением // ...

**Примечание [V617]:** {N17 <> aN3019} Бочко А.В., Лавренко В.А., Примачук В.Л., Проценко Т.Г. Окисление поликристаллов гексанита-Р различного фазового состава // ...

**Примечание [V618]:** {N174 <> aN612} Тхагапсоев Х.Г., Шхануков М.Х., Хапачев Б.С., Абретов М.Х. Определение контактной температуры при правке абразивных кругов алмази ...

**Примечание [V619]:** {N115 <> aN740} Новиков Н.В. и др. Определение вязкости разрушения сверхтвердых материалов и твердых сплавов при динамическом нагружении. - ...

**Примечание [V620]:** {N125 <> aN69} Основы алмазного шлифования / Семко М.Ф., Грабченко А.И., Раб А.Ф., Узунян М.Д., Пивоваров М.С. - К.: Техника, 1978. - 192 с. {Auto: Date ...

140. Островерх Е. В. Тепловые явления и качество поверхностного слоя при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: Автореф. дис... канд. техн. наук 05.03.01 – Киев, 1986. – 17 с.

141. Оценка прочности хрупких материалов путем изучения поверхности разрушения / Г. С. Писаренко, Ю. И. Козуб, В. Г. Солуянов и др. // Проблемы прочности. – 1975. – № 7. – С. 3–7.

142. Палатник Л. С., Гладких Л. И. О механизме структурных превращений в системе углерод–металл // ДАН СССР. – 1971. – Т. 200. – № 1. – С. 81–84.

143. Панасюк В. В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. – К.: Наук. думка, 1968. – 248 с.

144. Пат. 677894 Швейцария, МКИ В 24 В 53/00; В 23 Н 5/08; В 24 D 3/34. / V.L. Dobroskok, V.F. Drozhin, A.I. Grabchenko, A.I. Mikhailov, D.E. Belyavsky, V.L. Rokhlin (Kharkov SU); Заявл. 27.09.88; Оpubл. 15.07.91. – 20 с.

145. Поляков В. П., Ножкина А. В., Чириков Н. В. Алмазы и сверхтвердые материалы: Учеб. пособие. – М.: Металлургия, 1990. – 326 с.

146. Попов С. А. Геометрия рельефа режущей поверхности абразивных инструментов из синтетических алмазов и кубического нитрида бора // Синтетические алмазы в промышленности. – К.: Наук. думка, 1974. – С. 47–54.

147. Попов С. А., Лукашев Л. К. Процесс формообразования режущей поверхности абразивных кругов и изменение режущей поверхности во времени // Обработка металлов резанием. – 1976. – С. 41–48.

148. Попов С. А., Малевский Н. П., Терещенко Л. М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с.

149. Порошки алмазные синтетические. Общие технические условия. ДСТУ 3292-95. – К.: Госстандарт Украины. – 1996. – 71 с.

150. Пташников В. С. Влияние механизма износа круга на удельный расход эльбора при шлифовании // Абразивы. – 1978. – Вып. 9. – С. 6–10.

151. Пташников В. С. Исследование изнашивания шлифовальных кругов по гранулометрическому составу шлифматериала в шламе (обзор). Ч. 1 // Сверхтвердые материалы. – 1992. – № 3. – С. 38–44.

152. Пташников В. С. Исследование изнашивания шлифовальных кругов по гранулометрическому составу шлифматериала в шламе (обзор). Ч. 2 // Сверхтвердые материалы. – 1992. – № 4. – С. 44–49.

**Примечание [V621]:** {N126 <-> aN421} Островерх Е.В. Тепловые явления и качество поверхностного слоя при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов: Автореф. дис... канд. техн. наук. - Киев, 1986. - 17 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:44}

**Примечание [V622]:** {N127 <-> aN3268} Оценка прочности хрупких материалов путем изучения поверхности разрушения / Г.С. Писаренко, Ю.И. Козуб, В.Г. Солуянов и др. // Проблемы прочности. - 1975. - № 7. - С. 3-7. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:44}

**Примечание [V623]:** {N128 <-> aN3112} Палатник Л.С., Гладких Л.И. О механизме структурных превращений в системе углерод-металл // ДАН СССР. - 1971. - Т. 200. - № 1. - С. 81-84. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:45}

**Примечание [V624]:** {N130 <-> aN3050} Панасюк В.В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. - К.: Наук. думка, 1968. - 248 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:46}

**Примечание [V625]:** {N132 <-> aN652} Поляков В.П., Ножкина А.В., Чириков Н.В. Алмазы и сверхтвердые материалы: Учеб. пособие. - М.: Металлургия, 1990. - 326 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:47}

**Примечание [V626]:** {N133 <-> aN323} Попов С.А. Геометрия рельефа режущей поверхности абразивных инструментов из синтетических алмазов и кубического нитрида бора // Синтетические алмазы в

**Примечание [V627]:** {N134 <-> aN893} Попов С.А., Лукашев Л.К. Процесс формообразования режущей поверхности абразивных кругов и изменение режущей поверхности во

**Примечание [V628]:** {N135 <-> aN56} Попов С.А., Малевский Н.П., Терещенко Л.М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. - М.: Машиностроение, 1977. - 263 с. {A...

**Примечание [V629]:** {N136 <-> aN3080} Пташников В.С. Влияние механизма износа круга на удельный расход эльбора при шлифовании // Абразивы. - 1978. Вып. 9. - С. 6-10. {A...

**Примечание [V630]:** {N137 <-> aN3078} Пташников В.С. Исследование изнашивания шлифовальных кругов по гранулометрическому составу шлифматериала в шламе (обзор). Част...

**Примечание [V631]:** {N138 <-> aN3079} Пташников В.С. Исследование изнашивания шлифовальных кругов по гранулометрическому составу шлифматериала в шламе (обзор). Част...

153. Пташников В. С. Относительное диспергирование активных зерен эльбора при шлифовании как характеристика механизма износа круга // Абразивы. – 1976. – Вып. 12. – С. 1–7.

154. Пыжов И. Н. Алмазное шлифование двухслойных сверхтвердых композиционных материалов: Дис... канд. техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 1983. – 247 с.

155. Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении: Уч. пособие / Под. ред. А. И. Грабченко. – Харьков: ХГПУ, 1999. – 436 с.

156. Разрушение: Т.7: Разрушение неметаллов и композитных материалов // Пер. с англ. Под ред. Г. Либовица. – М.: Мир, Машиностроение, 1976. – 637 с.

157. Ребиндер П. А. Значение физико-химических процессов при механическом разрушении и обработке твердых тел в технике // Вестник АН СССР. – 1940. – Вып. 8. – С. 9.

158. Ребиндер П. А. Физико-химическая механика. – М.: Наука, 1979. – 124 с.

159. Редько С. Г. Шероховатость поверхности при шлифовании металлов // Сб. науч. сообщений (в помощь промышленности). Технология машиностроения. – 1958. – Вып. 13. – С. 14–18.

160. Резников А. Н., Мовла-Заде В. З. Исследование устойчивости алмазных зерен в связке алмазно-абразивного инструмента // Синтет. алмазы. – 1972. – № 5. – С. 5–10.

161. Резников А. Н., Федосеев О. В., Щипанов В. В. Теоретико-вероятностное описание режущего аппарата шлифовальных инструментов, толщины среза и усилия резания // Физика и химия обработки материалов. – 1976. – № 4. – С. 93–102.

162. Русанов В. В. Исследование физических явлений и качества поверхности при алмазном шлифовании композиций «СТМ–сталь»: Дис... канд. техн. наук 05.03.01. – Харьков, 1980. – 259 с.

163. Русанов В. В. Исследование физических явлений и качества поверхности при алмазном шлифовании композиции «синтетические сверхтвердые материалы – сталь»: Автореф. дис... канд. техн. наук 05.03.01. – Киев, 1980. – 23 с.

164. Рыжов Э. В., Колесников Ю. В., Суслов А. Г. Контактное разрушение твердых тел при статических и динамических нагрузках. – К.: Наук. думка, 1982. – 168 с.

**Примечание [V632]:** {N139 <> aN3077} Пташников В.С. Относительное диспергирование активных зерен эльбора при шлифовании как характеристика механизма износа кру...

**Примечание [V633]:** {N140 <> aN3042} Пыжов И.Н. Алмазное шлифование двухслойных сверхтвердых композиционных материалов: Дис... канд. техн. наук: 05.03.01. – Харьков. - ...

**Примечание [V634]:** {N141 <> aN518} Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении: Уч. пособие / Под. ред. А.И. Грабченко. - Харьков: ХГПУ, 1999. - 436 с. {Auto: ...

**Примечание [V635]:** {N142 <> aN3004} Разрушение: Пер. с англ. В 7 т. / Под ред. Г. Либовица. - М.: Мир, Машиностроение, 1976. - Т.7: Разрушение неметаллов и композитны...

**Примечание [V636]:** {N143 <> aN3154} Ребиндер П.А. Значение физико-химических процессов при механическом разрушении и обработке твердых тел в технике // Вестник АН ...

**Примечание [V637]:** {N144 <> aN3279} Ребиндер П.А. Физико-химическая механика. - М.: Наука, 1979. - 124 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:52}

**Примечание [V638]:** {N145 <> aN903} Редько С.Г. Шероховатость поверхности при шлифовании металлов // Сборник научных сообщений (в помощь промышленности). Технологи...

**Примечание [V639]:** {N146 <> aN593} Резников А.Н., Мовла-Заде В.З. Исследование устойчивости алмазных зерен в связке алмазно-абразивного инструмента // Синтет. алмазы, 1972. ...

**Примечание [V640]:** {N147 <> aN325} Резников А.Н., Федосеев О.В., Щипанов В.В. Теоретико-вероятностное описание режущего аппарата шлифовальных инструментов, толщины...

**Примечание [V641]:** {N148 <> aN64} Русанов В.В. Исследование физических явлений и качества поверхности при алмазном шлифовании композиций "СТМ - сталь": Дис... кан...

**Примечание [V642]:** {N149 <> aN422} Русанов В.В. Исследование физических явлений и качества поверхности при алмазном шлифовании композиций "синтетические ...

**Примечание [V643]:** {N150 <> aN547} Рыжов Э.В., Колесников Ю.В., Суслов А.Г. Контактное разрушение твердых тел при статических и динамических нагрузках. - Киев: Наук. думка, 1982. ...

165. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1976. – 271 с.
166. Сверхтвердые материалы / Францевич И. Н., Гнесин Г. Г., Курдюмов А. В. и др. – К.: Наук. думка, 1980. – 296 с.
167. Синтез алмазов / Под ред. Н. В. Новикова. – К.: Наук. думка, 1987. – 160 с.
168. Синтез алмазов типа карбонадо / Верещагин Л. Ф., Яковлев Е. Н., Варфоломеева Т. Д. и др. // Докл. АН СССР. – Т. 185. – 1969. – № 3. – С. 555–556.
169. Семенов А. П., Поздняков В. В., Крапошина Л. Б. Трение и контактное взаимодействие графита и алмаза с металлами и сплавами. – М.: Наука, 1974. – 110 с.
170. Семко М. Ф. Особенности процесса резания инструментами из синтетических алмазов крупных размеров // Синтетические алмазы. – 1971. – Вып. 6. – С. 33–35
171. Семко М. Ф. Эффективность обработки инструментами из синтетических поликристаллов алмазов // Машиностроитель. – 1975. – № 3. – С. 36–37.
172. Семко М. Ф., Грабченко А. И. О физико-механическом взаимодействии алмаза с обрабатываемым материалом // Станки и режущие инструменты. – 1969. – Вып. 10. – С. 14 – 18.
173. Семко М. Ф., Грабченко А. И., Ходоревский М. Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. – Харьков: Вища школа, 1980. – 192 с.
174. Сенькин Г. А., Гомон Т. О., Лысанов В. С. Влияние механических свойств заготовок эльбора-Р на работоспособность режущего инструмента // Алмазы. – 1971. – Вып. 10. – С. 14–16.
175. Синтетические алмазы в промышленности. – Киев: Наукова думка, 1974. – 327 с.
176. Синтетические сверхтвердые материалы: Т. 1. Синтез ССМ / Редкол: Н. В. Новиков и др. – Киев: Наук. думка, 1986. – 278 с.
177. Синтетические сверхтвердые материалы: Т.2. Композиционные инструментальные СМ / Редкол: Н. В. Новиков и др. – Киев: Наук. думка, 1986. – 262 с.
178. Синтетические сверхтвердые материалы: Т.3. Применение ССМ / Редкол: Н. В. Новиков и др. – Киев: Наук. думка, 1986. – 278 с.

**Примечание [V644]:** {N151 <> aN3036} Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. - М.: Металлургия, 1976. - 271 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:56}

**Примечание [V645]:** {N195 <> aN654} Францевич И.Н., Гнесин Г.Г., Курдюмов А.В. и др. Сверхтвердые материалы. - Киев: Наук. думка, 1980. - 296 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:21}

**Примечание [V646]:** {N25 <> aN3323} Верещагин Л.Ф., Яковлев Е.Н., Варфоломеева Т.Д. др. Синтез алмазов типа карбонадо // Докл. АН СССР. - Том 185. - № 3. - 1969. - С. 555-556. {Auto: Date 02/09/02 Time 20:54:44}

**Примечание [V647]:** {N152 <> aN662} Семенов А.П., Поздняков В.В., Крапошина Л.Б. Трение и контактное взаимодействие графита и алмаза с металлами и сплавами. - М.: Наука, 1974. - 110 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:56}

**Примечание [V648]:** {N154 <> aN3318} Семко М.Ф. Эффективность обработки инструментами из синтетических поликристаллов алмазов // Машиностроитель. - 1975. - № 3. - С. 36-37. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:57}

**Примечание [V649]:** {N156 <> aN70} Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. - Харьков: Вища школа, 1980. - 192 с. {Auto: Date ...}

**Примечание [V650]:** {N158 <> aN3321} Сенькин Г.А., Гомон Т.О., Лысанов В.С. Влияние механических свойств заготовок эльбора-Р на работоспособность режущего ...

**Примечание [V651]:** {N159 <> aN926} Синтетические алмазы в промышленности. - Киев: Наукова думка, 1974. - 327 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:00}

**Примечание [V652]:** {N160 <> aN645} Синтетические сверхтвердые материалы: В 3 т. / Редкол: Н.В. Новиков... - Киев: Наук. думка, 1986. - Т.1: Синтез ССМ. - 278 с. {Auto: Date ...}

**Примечание [V653]:** {N161 <> aN1091} Синтетические сверхтвердые материалы: В 3 т. / Редкол: Н.В. Новиков... - Киев: Наук. думка, 1986. - Т.2: Композиционные инструментальные ...

**Примечание [V654]:** {N162 <> aN1092} Синтетические сверхтвердые материалы: В 3 т. / Редкол: Н.В. Новиков... - Киев: Наук. думка, 1986. - Т.3: Применение ССМ. - 278 с. {Auto: ...}



179. Сирадзе А. М. Исследования обрабатываемости алмаза. – Тбилиси: Изд. ГПИ им. Ленина, 1975. – 185 с.
180. Скрябин В.А., Лемин В. А. Моделирование процесса субмикрорезания при обработке деталей закрепленным абразивом // Изв. вузов, Машиностр. – 1989. – № 12. – С. 118–122.
181. Созин Ю.И., Симкин Э. С., Оситинская Т. Д. К вопросу о графитизации алмаза // Сверхтвердые материалы. – 1992. – № 4. – С. 62–64.
182. Старков В. К. Дислокационные представления о резании металлов. – М.: Машиностроение, 1979. – 160 с.
183. Степанов И. Г., Кулаковский В. Н., Бондарь И. В. Особенности усталостного разрушения композиционных алмазосодержащих материалов, полученных методом пропитки // Сверхтвердые материалы. – 1994. – № 1. – С. 44–48.
184. Таратыпов О. В. Особенности микрорезания при суперфинишировании // Технология и производство деталей автомобильной технологии. – М., 1990. – С. 50–59.
185. Тененбаум М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.
186. Температурная зависимость микротвердости алмаза / Борисенко В. А., Григорьев О. Н., Мильман Ю. В. и др. // Синтетические алмазы. – 1973. – Вып. 5. – С. 12–13.
187. Технологические остаточные напряжения / А. В. Подзей, А. М. Сулима, М. И. Евстигнеев, Г. З. Серебренников. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
188. Трение, изнашивание и смазка: Справочник / Под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисына. – М.: Машиностроение, 1979. – Кн. 2. – 358 с.
189. Тхагапсоева Х. Г., Хапачев Б. С. Об износе алмаза при правке абразивных кругов // Сверхтвердые материалы. – 1987. – № 2. – С. 30–35.
190. Узунян М. Д. Теоретический анализ плотности распределения зерен на рабочей поверхности алмазного круга // Резание и инструмент. – Харьков. – 1980. – Вып. 23. – С. 104–110.
191. Узунян М. Д. Реальное число зерен на рабочей поверхности алмазного круга // Резание и инструмент. – 1978. – Вып. 20. – С. 23–27.
192. Уотермен Д. Руководство по экспертным системам / Пер.с англ. – М.: Мир, 1989. – 369 с.

**Примечание [V655]:** {N163 <> aN3249} Сирадзе А.М. Исследования обрабатываемости алмаза. Тбилиси, изд. ГПИ им. Ленина, 1975. 185 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:02}

**Примечание [V656]:** {N164 <> aN590} Скрябин В.А., Лемин В.А. Моделирование процесса субмикрорезания при обработке деталей закрепленным абразивом // Изв. вузов. Машиностр. - 1989. - № 12. - с. 118-122. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:03}

**Примечание [V657]:** {N165 <> aN3018} Созин Ю.И., Симкин Э.С., Оситинская Т.Д. К вопросу о графитизации алмаза // Сверхтвердые материалы. - 1992. - № 4. - С. 62-64. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:03}

**Примечание [V658]:** {N167 <> aN3308} Старков В.К. Дислокационные представления о резании металлов. - М.: Машиностроение, 1979. - 160 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:05}

**Примечание [V659]:** {N168 <> aN3009} Степанов И.Г., Кулаковский В.Н., Бондарь И.В. Особенности усталостного разрушения ...

**Примечание [V660]:** {N169 <> aN581} Таратыпов О.В. Особенности микрорезания при суперфинишировании // Технол. и пр-во деталей автомоб. те ...

**Примечание [V661]:** {N170 <> aN3039} Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию. - М.: Машиностроение ...

**Примечание [V662]:** {N15 <> aN3160} Борисенко В.А., Григорьев О.Н., Мильман Ю.В. и др. Температурная зависимость ...

**Примечание [V663]:** {N171 <> aN322} Технологические остаточные напряжения / А.В. Подзей, А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев, Г.З. Серебренников. ...

**Примечание [V664]:** {N172 <> aN166} Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. Кн. 2. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисына. - М. ...

**Примечание [V665]:** {N175 <> aN3248} Тхагапсоева Х.Г., Хапачев Б.С. Об износе алмаза при правке абразивных кругов //Сверхтвердые материалы. - ...

**Примечание [V666]:** {N176 <> aN1052} Узунян М. Д. Теоретический анализ плотности распределения зерен на рабочей поверхности алмазного кр ...

**Примечание [V667]:** {N177 <> aN3127} Узунян М.Д. Реальное число зерен на рабочей поверхности алмазного круга // Резание и инструмент. Харьк ...

193. Усманов А. И. Электростатические явления при трении и обработке материалов резанием: Автореф. дис... канд. техн. наук 05.03.01. – Ташкент, 1975. – 280 с.

194. Філатов Ю. Д. Наукові основи прецизійного полірування поверхонь деталей з кремнеземвміщуючих матеріалів: Дис...докт. техн. наук: 05.03.01. – К., 1996. – 35 с.

195. Федорович В. А. 3D моделирование напряженно-деформированного состояния системы «СТПМ–зерно–связка» при алмазном шлифовании // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2001. – С. 184–190.

196. Федорович В. А. Способы шлифования с комбинированным управлением режущим рельефом кругов // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 45. – С. 26–28.

197. Федорович В.А. Теоретическая экспертная система процесса алмазного шлифования сверхтвердых материалов // Сучасне машинобудування. – 2000. – № 3–4. – С. 100–105.

198. Федорович В. А. Удельный расход и удельный износ алмазных зерен при шлифовании СТПМ // Резание и инструмент в технологических системах. Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 54. – С. 230–233.

199. Федорович В. А. Управление параметрами субмикрорельефа алмазных зерен при шлифовании сверхтвердых материалов // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць НТУ «ХПІ». – Харків. – 2001. – Вип. 1(4). – С. 50–54.

200. Федорович В. А., Гринько С. А. Определение фактической площади контакта РПК с обрабатываемым СТПМ // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць ХДПУ. – Харків: ХДПУ. – 2000. – Вип. 1(3). – С. 266–272.

201. Федорович В. А., Козакова Н. В. Влияние прочности элементов системы «СТМ–зерно–связка» на эффективность шлифования // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2003. – № 9, т. 1. – С. 85–92.

202. Федорович В. А., Пупань Л. И. Электронно-микроскопическое исследование поверхности алмазных зерен шлифовального круга после обработки АСБ // Резание и инструмент. – 1981. – Вып. 20. – С. 23–27.

**Примечание [V668]:** {N179 <> aN3188} Усманов А.И. Электростатические явления при трении и обработке материалов резанием: Автореф. дис... канд. техн. наук. - Ташкент, 1975. - 280 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:11}

**Примечание [V669]:** {N181 <> aN3257} Філатов Ю.Д. Наукові основи прецизійного полірування поверхонь деталей з кремнеземвміщуючих матеріалів: Дис...докт. техн. наук: 05.03.01 / Ін-т надтвердих матеріалів НАН України. - К., 1996. - 35 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:12}

**Примечание [V670]:** {N182 <> aN3031} Федорович В.А. 3D моделирование напряженно-деформированного состояния системы "СТПМ-зерно-связка" при алмазном шлифовании // Резание и инструмент в технологических системах: Межд.

**Примечание [V671]:** {N183 <> aN3032} Федорович В.А. Способы шлифования с комбинированным управлением режущим рельефом кругов // Вестник ХГПУ. - Харьков: ХГПУ. - 1999. Вып. 45. - С. 26-28. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:13}

**Примечание [V672]:** {N184 <> aN3244} Федорович В.А. Теоретическая экспертная система процесса алмазного шлифования сверхтвердых материалов // Сучасне машинобудування. 2000. - № 3-4. - С. 100-105. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:14}

**Примечание [V673]:** {N185 <> aN3081} Федорович В.А. Удельный расход и удельный износ алмазных зерен при шлифовании СТПМ // Резание и инструмент в технологических системах. Межд. научн.-техн. сборник. - Харьков: ХГПУ. - 1999. Вып. 54. - С. 230-233.

**Примечание [V674]:** {N186 <> aN3088} Федорович В.А. Управление параметрами субмикрорельефа алмазных зерен при шлифовании сверхтвердых материалов // Високі технології в машинобудуванні. Зб. наук. праць НТУ "ХПІ". - Харків. - 2001. Вип. 1(4). - С.

**Примечание [V675]:** {N187 <> aN3058} Федорович В.А., Гринько С.А., Определение фактической площади контакта РПК с обрабатываемым СТПМ // Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць ХДПУ. - Харків: ХДПУ. - 2000. Вип. 1(3). - С. 266-272.

**Примечание [V676]:** {N188 <> aN3194} Федорович В.А., Пупань Л.И. Электронно-микроскопическое исследование поверхности алмазных зерен шлифовального круга после обработки АСБ // Резание и инструмент. - Харьков: Вища школа. - 1981. Вып. 20.

203. Федосеев Д. В., Успенская К. С. Окисление алмаза (Обзор) // Синтетические алмазы. – 1976. – Вып. 4. – С. 18–24.
204. Физические свойства алмаза: Справочник. – К.: Наук. думка, 1987. – 76 с.
205. Финкель В. М. Физические основы торможения разрушения. – М.: Металлургия, 1977. – 359 с.
206. Характеристики монокристаллических алмазных шлифпорошков марок АС100, АС125, АС160 // Сверхтвердые материалы. – 1990. – № 4. – С. 43–48.
207. Хеллан К. Введение в механику разрушения. – М.: Мир, 1988. – 364 с.
208. Ходоровский М. Г. Исследование процесса алмазного шлифования синтетических сверхтвердых материалов: Дис... канд. техн. наук: 05.03.01. – Х., 1975. – 214 с.
209. Чачин В. Н., Дорофеев В. Д. Профилирование алмазных шлифовальных кругов. – Минск: Наука и техника, 1974. – 160 с.
210. Чачин В. Н., Дорофеев В. Д. Прочность закрепления алмазного зерна в связке шлифовального круга // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. – Минск, 1972. – № 1. – С. 73–76.
211. Чеповецкий И. Х. Механика контактного взаимодействия при алмазной обработке. – К.: Наукова думка, 1978. – 228 с.
212. Чеповецкий И. Х. Основы финишной алмазной обработки. – К.: Наукова думка, 1980. – 468 с.
213. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
214. Шаилendra К. Д., Глухов А. Б., Узунян М. Д. Теоретический анализ разноразмерности алмазных зерен на поверхности круга // Резание и инструмент. – 1992. – Вып. 45. – С. 48–52.
215. Шафрановский И. И. Алмазы. – М.: Наука, 1964. – 173 с.
216. Шероховатость поверхностей монокристаллов корунда после механической обработки / И. П. Бабийчук, Е. Р. Добровинская, Л. А. Литвинов, А. П. Радченков // Сверхтвердые материалы. – 1988. – №3. – С. 57–58.
217. Шлифование с автоматической стабилизацией режущей способности круга / Голубев И. В., Гродзинский Э. Я., Свешников В. К., Стебаев А. И. // Станки и инструмент. – 1984. – № 1. – С. 20–22.

**Примечание [V677]:** {N192 <> aN3021} Федосеев Д.В., Успенская К.С. Окисление алмаза (Обзор) // Синтетические алмазы. - 1976. Вып. 4. - С. 18-24. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:19}

**Примечание [V678]:** {N193 <> aN3067} Физические свойства алмаза: Справочник. - Киев: Наук. думка, 1987. - 76 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:19}

**Примечание [V679]:** {N194 <> aN3316} Финкель В. М. Физические основы торможения разрушения. - М о Металлургия, 1977. - 359 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:20}

**Примечание [V680]:** {N196 <> aN3012} Характеристики монокристаллических алмазных шлифпорошков марок АС100, АС125, АС160 // Сверхтвердые материалы. - 1990. - № 4. С. 43-48. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:21}

**Примечание [V681]:** {N197 <> aN3051} Хеллан К. Введение в механику разрушения. - М.: Мир, 1988. - 364 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:22}

**Примечание [V682]:** {N198 <> aN3326} Ходоровский М.Г. Исследование процесса алмазного

**Примечание [V683]:** {N200 <> aN119} Чачин В.Н., Дорофеев В.Д. Профилирование алмазных

**Примечание [V684]:** {N201 <> aN956} Чачин В.Н., Дорофеев В.Д. Прочность закрепления алмазного зер

**Примечание [V685]:** {N202 <> aN120} Чеповецкий И.Х. Механика контактного взаимодействия при

**Примечание [V686]:** {N203 <> aN121} Чеповецкий И.Х. Основы финишной алмазной обработки. - К.:

**Примечание [V687]:** {N205 <> aN3193} Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. - М.: Наука, 19

**Примечание [V688]:** {N206 <> aN606} Шаилendra К.Д., Глухов А.Б., Узунян М.Д. Теоретический анализ

**Примечание [V689]:** {N207 <> aN3254} Шафрановский И.И. Алмазы. - М.: Наука, 1964. - 173 с. {Auto: Date

**Примечание [V690]:** {N208 <> aN3276} Шероховатость поверхностей монокристаллов корунда после

**Примечание [V691]:** {N33 <> aN961} Голубев И.В., Гродзинский Э.Я., Свешников В.К., Стебаев А.И.

218. Щукин Е. Д. Понижение поверхностной энергии и изменение механических свойств твердых тел под влиянием окружающей среды // Физико-механическая механика материалов. – 1976. – № 1. – С. 25–31.

219. Электроалмазное шлифование инструментальных материалов / М. Ф. Семко, А. И. Грабченко, Н. В. Левченко, А. Ф. Раб – К.: Вища школа, 1974. – 120 с.

220. Электронно-микроскопическое исследование характера износа единичных алмазных зерен // Семко М. Ф., Красильников Е. В., Сизый Ю. А., Узунян М. Д. // ДАН СССР. – 1975 – Т. 220 – № 6. – С. 1303–1305.

221. Ящерицын П. И., Дорофеев В. Д., Гринин Г. Н. Профилирование алмазно-абразивных инструментов пластическим деформированием. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1982. – 112 с.

222. Bandyopadhyay B. P., Ohmori H., Takahashi I. Ductile Regime Mirror Finish Grinding of Ceramics with Electrolytic In-process Dressing (ELID) // Grinding, Materials and Manufacturing Processes. – 1996. 11. – P. 789–801.

223. DeChiffre, L., Hansen, H.N., Bronstein, A., 1996, Investigation on the Surface Topography in Polishing Using Atomic Force Microscopy, Annals of CIRP, 45/1: 523–528.

224. Dornfeld, D., Liu, J.J.B., 1993, Abrasive Texturing and Burnishing Process Monitoring Using Acoustic Emission, Annals of CIRP, 42/1: 397–400.

225. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids // Philosophica Transactions of the Royal Society. – 1921. – (A) 221. – P. 163–198.

226. Howes V.R. Physical properties of diamond // Oxford: Clarendon. – 1965. – P. 174–183.

227. Howes V.R. The critical stress for the production of pressure crack figures on diamond faces // Proc. Phys. Soc. London. – 1959. – Vol. 74. – № 475. – P. 48–52.

228. Kaczmarek J.: Zastosowanie metodoy SCGC do oceny technologii i prognozy uzytkowania powierzchni obrobianych skawaniem. Prace Miedzynarodowego Sympozjum nt.: «Zaganienia Inzynierii Powierzchni w Obrobce Skawaniem». Wroslaw – Szklarska Poreba, czerwiec 1999.

229. Kakino Y., Matsybara A., Yamaji I., Matyda K., Nakagawa H., Hirogaki N., Kita Y. // In-situ Measurement of Grinding Wheel Surface Topography Int. J. Japan Soc. Prec. Eng. – Vol. 31, № 4 (Dec. 1997), 1 – P. 273–277.

**Примечание [V692]:** {N211 <> aN966} Электроалмазное шлифование инструментальных материалов / М.Ф. Семко, А.И. Грабченко, Н.В. Левченко, А.Ф. Раб – К.: Вища школа, 1974. – 120 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:30}

**Примечание [V693]:** {N157 <> aN3046} Семко М.Ф., Красильников Е.В., Сизый Ю.А., Узунян М.Д. Электронно-микроскопическое исследование характера износа единичных алмазных зерен // ДАН СССР. - 1975. - 220. - № 6. - С. 1303-1305. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:25:59}

**Примечание [V694]:** {N212 <> aN138} Ящерицын П.И., Дорофеев В.Д., Гринин Г.Н. Профилирование алмазно-абразивных инструментов пластическим деформированием. - Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1982. - 112 с. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:31}

**Примечание [V695]:** {N213 <> aN179} Bandyopadhyay B.P., Ohmori H., Takahashi I. Ductile Regime Mirror Finish Grinding of Ceramics with Electrolytic In-process Dressing (ELID) // Grinding, Materials and Manufacturing Processes. - 1996. 11. - P. 789-801. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:32}

**Примечание [V696]:** {N214 <> aN460} DeChiffre, L., Hansen, H.N., Bronstein, A., 1996, Investigation on the Surface Topography in Polishing Using Atomic Force Microscopy, Annals of CIRP, 45/1: 523-528. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:33}

**Примечание [V697]:** {N215 <> aN460} Dornfeld, D., Liu, J.J.B., 1993, Abrasive Texturing and Burnishing Process Monitoring Using Acoustic Emission, Annals of CIRP, 42/1: 397-400. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:34}

**Примечание [V698]:** {N216 <> aN3115} Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids // Philosophica Transactions of the Royal Society. - 1921. - (A) 221. - P. 163-198. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:35}

**Примечание [V699]:** {N217 <> aN3177} Howes V.R. Physical properties of diamond // Oxford: Clarendon. - 1965. - P. 174-183. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:36}

**Примечание [V700]:** {N218 <> aN3178} Howes V.R. The critical stress for the production of pressure crack figures on diamond faces // Proc. Phys. Soc. London. - 1959. - Vol. 74. - № 475. - P. 48-52. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:37}

**Примечание [V701]:** {N219 <> aN3325} Kaczmarek J.: Zastosowanie metodoy SCGC do oceny technologii i prognozy uzytkowania powierzchni obrobianych skawaniem. Prace Miedzynarodowego Sympozjum nt.: «Zaganienia Inzynierii Powierzchni w Obrobce Skawaniem». Wroslaw – Szklarska Poreba, czerwiec 1999. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:38}

**Примечание [V702]:** {N220 <> aN1172} Kakino Y., Matsybara A., Yamaji I., Matyda K., Nakagawa H., Hirogaki N., Kita Y. // In-situ Measurement of Grinding Wheel Surface Topography Int. J. Japan Soc. Prec. Eng. – Vol. 31, № 4 (Dec. 1997), 1 – P. 273–277. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:39}



230. Kao R., Perrone N. Large deflection solution of the coaxialring-circular-glass-plate flexure problem // J. Amer. Ceram. Soc. – 1971. – 5. – № 11. – P. 566–571.

231. Kundrak J., Szabo Z. Process, method and equipment for grinding of hard materials // Technology'92, Kassa. – 1992, sept. 8. – P. 224–227.

232. Loladze T. N., Batiashvili B. L. Low temperature precision grinding and outlook of its development // Ln: CIPR Ann. – 1982. 31. № 1. – P. 205–210.

233. Lonardo P. M., Trumpold H., De Chiffre L., 1996, Progress in 3D Surface Microtopography Characterization, Annals of CIRP, 45/2: 589–598.

234. Matsuo T., Touge M., Yamada H., 1997, High-Precision Surface Grinding of Ceramics with Superfine Grain Diamond Cup Wheels, Annals of CIRP, 46/1: 249–252.

235. Moore D. Principles and Applications of Tribology. – M.: Мир, 1978. – 487 c.

236. Nakao M., Hatamura Y., 1996, Development of an Intelligent Face Grinding Machine to Fabricate Ultraflat Surfaces on Thin, Brittle Substrates, Annals of CIRP, 45/1: 397–401.

237. Ohmori H., Nakagawa T., 1990, Mirror Surface Grinding of Silicon Wafers with Electrolytic In-process Dressing, Annals of CIRP, 39/1: 329–332.

238. Phaal S., Woolds G. X-ray and metal inclusions in synthetic diamond // Nature. – 1966, 212. – P. 1227–1229.

239. Profiliermaschine fur Diamantsch leifscheiben // Ln: Maschine. – 1983, 37. – № 5. – P. 54.

240. Rooke D. P., Jones D. A. Stress intensity factors in fretting fatigue // J. Strain Anal. – 1979. – 14. – № 1. – P. 1–6.

241. Rupp W. J. Mechanism of the Diamond Lapping Process // Applied Optics. – 1974. – № 6. – P. 1264–1269.

242. Sato M., Kato Y., Aoki S. Effects of crystal orientation on the cutting mechanism of the aluminium single crystal Bulletin // JSME 26(1983)215. – P. 890–896.

243. Sato M., Kato Y., Tuchiya K. Effects of Material Anisotropy upon the cutting mechanism // Trans. JIM. – 1978. – Vol. 19. – P. 530–536.

244. Schmitt M., Paulmier D., LeHuu T. Influence of Diamond Crystals Orientation of their Tribological Behaviour under various environments // 14th International Vacuum Congress. – 1998, Birmingham.

**Примечание [V703]:** {N221 <> aN3121} Kao R., Perrone N. Large deflection solution of the coaxialring-circular-glass-plate flexure problem // J. Amer. Ceram. Soc. - 1971. - 5. - № 11. - P. 566-571. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:35}

**Примечание [V704]:** {N222 <> aN3148} Kundrak J., Szabo Z. Process, method and equipment for grinding of hard materials // Technology'92, Kassa. - 1992, sept.8. - P. 224-227. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:36}

**Примечание [V705]:** {N223 <> aN142} Loladze T.N., Batiashvili B.L. Low temperature precision grinding and outlook of its development // Ln: CIPR Ann. - 1982, 31. № 1. - P. 205-210. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:37}

**Примечание [V706]:** {N224 <> aN464} Lonardo, P.M., Trumpold, H., De Chiffre, L., 1996, Progress in 3D Surface Microtopography Characterization, Annals of CIRP, 45/2: 589-598. {Auto: Date ...}

**Примечание [V707]:** {N225 <> aN466} Matsuo, T., Touge, M., Yamada, H., 1997, High- Precision Surface Grind ...

**Примечание [V708]:** {N226 <> aN3146} Moore D. Principles and Applications of Tribology. - M.: Мир, 1978. - 487 c. ...

**Примечание [V709]:** {N227 <> aN468} Nakao, M., Hatamura, Y., 1996, Development of an Intelligent Face Grin ...

**Примечание [V710]:** {N228 <> aN470} Ohmori, H., Nakagawa, T., 1990, Mirror Surface Grinding of Silicon Waf ...

**Примечание [V711]:** {N229 <> aN3069} Phaal S., Woolds G. X-ray and metal inclusions in synthetic diamond // ...

**Примечание [V712]:** {N230 <> aN143} Profiliermaschine fur Diamantsch leifscheiben // Ln: Maschine. - 1983, 37. ...

**Примечание [V713]:** {N231 <> aN3054} Rooke D.P., Jones D.A. Stress intensity factors in fretting fatigue // J. ...

**Примечание [V714]:** {N232 <> aN3263} Rupp W.J. Mechanism of the Diamond Lapping Process // Applied Op ...

**Примечание [V715]:** {N233 <> aN3142} Sato M., Kato Y., Aoki S. Effects of crystal orientation on the cutting mecl ...

**Примечание [V716]:** {N234 <> aN3141} Sato M., Kato Y., Tuchiya K. Effects of Material Anisotropy upon the ...

**Примечание [V717]:** {N235 <> aN3150} Schmitt M., Paulmier D., LeHuu T. Influence of Diamond Crystals Orient ...

245. Semba T., Tani Y., Sato H., 1996, Development of Melamine-Bonded Diamond Wheels with High Porosity for Smooth and Mirror Finishing of Die Materials, Annals of CIRP, 45/1: 315–318.

246. Suzuki K., Tochinali H., Uematsu T., Mishihiro S., 1993, A New Grinding Method for Ceramics Using a Biaxially Vibrated Nonrotational Ultrasonic Tool, Annals of CIRP, 42/1: 417–420.

247. T. Warren Liao Flexural Strength Of Creep Feed Ground Ceramics: General Pattern, Ductile–Brittle Transition And MLP Modeling // Machine Tools & Manufacture. – 1998. – V. 38, – № 4. – P. 257–275.

248. Teter D. Computational Alchemy: The Search for New Superhard Materials // MRS Bulletin, January. – 1998. – Vol. 23. – № 1. – P. 22–27.

249. Tomita Y., Eda H., 1996, A Study of the Ultra Precision Grinding Process on a Magnetic Disk Substrate-Development of New Bonding Materials for Fixed Abrasives of Grinding Stone, Wear, 195: 74–80.

250. Ueda K., Iwata K., Nakayama K. Chip Formation Mechanism in single crystal cutting of b-brass // Annals of the CIRP 29(1980)1. – P. 41–46.

251. Wakatsuki M., Ichinose K., Aoki T. Synthesis of polycrystalline cubic // B.N. – Material Research Bulletin. – 1972. – Vol. 7, – P. 999–1004.

252. Wunder W. Machining stlattice, titanium dioxide compound and porous ceramic work-pieces with diamond tools // Ln: YDR. – 1975. – № 11. – P. 402–405.

253. Xie Y., Bhushan B., 1996, Effects of Particle Size, Polishing Pad and Contact Pressure in Free Abrasive Polishing, Wear, 200: 281–295.

254. Yanagi K., Tsukada Y., Yamada R., 1992, Surface Topography Assessment of High-Precision Coated Abrasive Tape and Estimation of Its Machining Performance, Annals of CIRP, 41/1: 377–380.

**Примечание [V718]:** {N236 <> aN475} Semba, T., Tani, Y., Sato, H., 1996, Development of Melamine-Bonded Diamond Wheels with High Porosity for Smooth and Mirror Finishing of Die Materials, Annals of CIRP, 45/1: 315-318. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:44}

**Примечание [V719]:** {N237 <> aN476} Suzuki, K., Tochinali, H., Uematsu, T., Mishihiro, S., 1993, A New Grinding Method for Ceramics Using a Biaxially Vibrated Nonrotational Ultrasonic Tool, Annals of CIRP, 42/1: 417-420. {Auto: Date 03/09/02 Time 23:26:45}

**Примечание [V720]:** {N238 <> aN3264} T. Warren Liao Flexural Strength Of Creep Feed Ground Ceramics: General Pattern, Ductile-Brittle Transition And MLP Modeling // Machine Tools & Man...

**Примечание [V721]:** {N239 <> aN3143} Teter D. Computational Alchemy: The Search for New Superhard Materials // MRS Bulletin, January. - 1998. - Vol. 23...

**Примечание [V722]:** {N240 <> aN480} Tomita, Y., Eda, H., 1996, A Study of the Ultra Precision Grinding Process on a Magnetic Disk Substrate-Development of...

**Примечание [V723]:** {N241 <> aN3151} Ueda K., Iwata K., Nakayama K. Chip Formation Mechanism in single crystal cutting of b-brass // Annals of the CIRP...

**Примечание [V724]:** {N242 <> aN3062} Wakatsuki M., Ichinose K., Aoki T. Synthesis of polycrystalline cubic // B.N. - Material Research Bulletin. - 1972. Vol...

**Примечание [V725]:** {N243 <> aN147} Wunder W. Machining stlattice, titanium dioxide compound and porous ceramic work-pieces with diamond tools...

**Примечание [V726]:** {N244 <> aN487} Xie, Y., Bhushan, B., 1996, Effects of Particle Size, Polishing Pad and Contact Pressure in Free Abrasive Polishing, We...

**Примечание [V727]:** {N245 <> aN488} Yanagi, K., Tsukada, Y., Yamada, R., 1992, Surface Topography Assessment of High-Precision Coated Abrasive Tape...

**Примечание [V728]:** {N210 <> aN3303} Шукин Е.Д. Понижение поверхностной энергии и изменение механических свойств твердых тел по...

**Примечание [V729]:** {N153 <> aN3319} Семко М.Ф. Особенности процесса резания инструментами из синтетических алмазов крупных...

**Примечание [V730]:** {N64 <> aN3328} Ефимов Ю.Н., Сапожников Д.Б. Реализация методов конечных элементов на ЭВМ для решения плоской задачи...

**ГРАБЧЕНКО** Анатолій Іванович, **ФЕДОРОВИЧ** Володимир Олексійович

## Монографія

Роботу до друку рекомендував  
О. М. Шелковий

План 2008, поз. 90

Підп. до друку                                  Формат 60×84 1/16. Папір Prima Copy. Riso-друк.  
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 20,0. Обл.-вид. арк. 22,0. Наклад 300 прим.  
Зам. №                                  Ціна договірної.

Видавничий центр НТУ "ХПІ".  
Свідцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07. 2000.  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня НТУ "ХП". 61002, Харків, вул. Фрунзе, 2